



Modifikace geosilikátů organickými a anorganickými plnivy

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jindřich Fofaňka**
Vedoucí práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.





Modification of geosilicates with organic and anorganic additives

Master thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301T048 – Engineering Technology and Materials
Author: **Bc. Jindřich Fofonka**
Supervisor: prof. Ing. Petr Louda, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jindřich Fofonka
Osobní číslo: S17000246
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Název tématu: Modifikace geosilikátů organickými a anorganickými plnivy
Zadávající katedra: Katedra materiálu

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

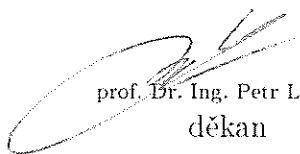
1. Uveďte a prostudujte možnosti organických a anorganických plniv v geosilikátech.
2. Navrhněte postup pro přípravu kompozitních materiálů s geosilikátovou matricí pomocí různých druhů organických a anorganických plniv.
3. Charakterizujte vybrané vlastnosti získaných kompozitních materiálů.
4. Získané výsledky diskutujte a formulujte závěr.

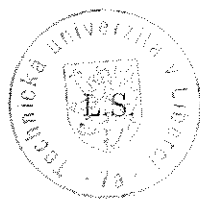
Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: 40 - 50 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


- [1] DAŘOUREK, Karel. *Kompozitní materiály - modely a vlastnosti*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. ISBN 80-7083-972-4.
- [2] DAŘOUREK Karel. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [3] TALREJA,R. a Chandra Veer SINGH.*Damage and failure od composite materials*. Cambrige, New York: Cambrige University Press, 2012. ISBN 9780521819428 0521819423.
- [4] HULL, Derek a T.W.CLYNE. *An introduction to composite materials*. 2nd ed.Cambrige, New York: Cambrige University Press, 1996. Cambrige solid state science series. ISBN 0521381908 0521388554.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Petr Louda, CSc.
Katedra materiálu
Konzultant diplomové práce: Ing. Totka Bakalova, Ph.D.
Katedra materiálu

Datum zadání diplomové práce: 30. října 2017
Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2019


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 30. října 2017

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucímu Diplomové práce panu prof. Ing. Petru Loudovi, CSc. a konzultantům paní Ing. Totce Bakalové a panu Ing. Vladimírovi Kovačičovi za odbornou pomoc při zpracování tématu, ochotu a množství poskytnutých rad.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je prostudování možností využití vybraných anorganických a organických plniv v geosilikátech. Dále navržení postupu pro přípravu kompozitních materiálů s geosilikátovou maticí pomocí různých druhů plniv. Tato práce má za cíl vymezit vybrané vlastnosti těchto kompozitních materiálů, porovnat vlastnosti organických a anorganických plniv modifikovaných geosilikátů.

Práce pojednává obecně o geosilikátech, organických a anorganických plnivech, jejich historii, dosavadních poznatcích a výrobě. Vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám. Pevnost v tahu ohybem, tlakové zkoušce a zkoušce houževnatosti pomocí Charpyho kladiva. Data byla zpracována do tabulek a grafů a vzájemně porovnány.

Provedeným výzkumem jsme zjistili, že některé z vybraných organických plniv mohou být úspěšně využity v kombinaci geosilikátovou maticí. Tyto poznatky mohou být použity dále jako podklad při řešení možnosti využití převážně organického odpadu v geosilikátech a dosahovat jejich kombinací zajímavých mechanických vlastností, které jistě najdou své uplatnění.

Klíčová slova: Geosilikát, alkalická aktivace, organická plniva, anorganická plniva, Baucis LD 85.

Abstract

This thesis examines possible utilisation of selected inorganic and organic fillers in geosilicates. It furthermore proposes preparation methods for geosilicate composite materials using various filling agents. Its target is to determine selected qualities of these composite materials and to compare properties of the organic and inorganic fillers of modified geosilicates.

The thesis is generally about geosilicates, about organic and inorganic fillers, their history, current know-how and production. The following mechanical tests were carried out on the specimen: Pull flexion endurance test, compression test and toughness test with the Charpy hammer. The data was then processed into tables and graphs and compared.

The research proved that some of the selected organic filling agents can be successfully exploited when combined with a geosilicate matrix. These results can be further used as a base for exploring new possibilities to the use of the mostly organic waste in geosilicates and for creating more interesting, certainly applicable mechanical qualities by combining the fillers.

Key words: Geosilicate, alkaline activation, organic fillers, inorganic fillers, filling agents, Baucis LD 85

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
SEZNAM GRAFŮ	13
SEZNAM ZKRATEK.....	14
1 Úvod.....	15
2 TEORETICKÁ ČÁST	16
2.1 Geopolymer	16
2.1.1 Vznik a historie geopolymérů	16
2.1.2 Popis geopolymerních materiálů.....	17
2.1.3 Výroba.....	19
2.2 Mechanismus alkalické aktivace a struktura geopolyméru	20
2.2.1 Alkalická aktivace	20
2.3 Geopolymerace – alkalická aktivace a polykondenzace	22
2.3.1 Alkalické aktivátory	22
2.3.1 Hydroxid draselný	23
2.3.2 Vodní sklo	23
2.3.3 Struktura geopolyméru	25
2.4 Příprava geopolymérů	26
2.4.1 Reakční mechanismus	27
2.5 Hybridní kompozitní materiály	28
2.5.1 Definice kompozitních materiálů.....	28
2.5.2 Charakteristika hybridních systémů.....	28
2.6 Použité materiály k přípravě matrice.....	29
2.6.1 Metakaolin.....	29
2.6.2 Portlandský cement	29
2.6.3 Voda	30
2.7 Použitá organická plniva	31
2.7.1 Konopí.....	31
2.7.2 Kokos	32

2.7.3	Viskózová vlákna	33
2.8	Ze zástupců pro anorganická plniva	34
2.8.1	Polyesterová vlákna	34
2.8.2	Čedičová vlákna	35
3	CÍL PRÁCE	37
4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
4.1	Metodika práce	38
4.2	Základní materiál	38
4.3	Receptury	40
4.4	Použité plnivo	40
4.5	Příprava zkušebních vzorků	44
4.5.1	Míchání směsi	44
4.5.2	Zkušební tělesa	44
4.6	Popis prováděných zkoušek	45
4.6.1	Tvorba trhlin	45
4.6.2	Objemová hmotnost v čerstvém stavu	46
4.6.3	Objemová hmotnost v tuhém stavu	46
4.6.4	Výsledky objemové roztažnosti a diskuze	47
4.6.5	Pevnost v tahu ohybem	49
4.6.6	Výsledky pevnosti v tahu ohybem	52
4.6.7	Výsledky - Mez pružnosti v tahu a Tažnosti	56
4.6.8	Pevnost v tlaku	58
4.6.9	Výsledky pevnosti v tlaku	60
4.6.10	Zkouška rázem	64
4.6.11	Výsledky zkoušek houževnatosti	67
5	DISKUZE VÝSLEDKŮ	71
6	ZÁVĚR	74
	Seznam použité literatury	75
	Přílohy	78

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Davidovitsův základní model geopolymerní struktury [9]	18
Obr. 2: Prostorové uspořádání PS [3]	21
Obr. 3: Prostorové uspořádání PSS [3]	21
Obr. 4: Prostorové uspořádání PSDS [3]	21
Obr. 5: Navrhovaný mechanismus rozpouštění a následné kondenzace hlinitokřemičitanů [8]	22
Obr. 6: Současný pohled na Barbarosovu strukturu geopolymerní [10].....	25
Obr. 7: Teoretický model reakčního mechanismu v alkalicky aktivované strusce [14] ...	27
Obr. 8: Příčný řez (vlevo) a podélný pohled (vpravo) na vlákna konopí [23]	32
Obr. 9: Vlevo snímek vlákna a vpravo pohled na povrch (levý snímek 5x přiblížen [23])	33
Obr. 10: Schéma výroby viskózy z celulózy použitím hydroxidu sodného a sulfidu uhličitého [25]	33
Obr. 11: Řez vláknem viskózy [33]	34
Obr. 12: Schéma struktury polyesteru [23]	34
Obr. 13: Vlevo čedičová vlákna [29], vpravo lom čedičového vlákna [30]	36
Obr. 14: Schéma přípravy z letáku od společnosti České lupkové závody a.s.	38
Obr. 15: Křemenný písek	39
Obr. 16: Vážení konopného vlákna.....	40
Obr. 17: Dřevěné plnivo (smrk)	41
Obr. 18: Kokosové vlákno Obr. 19: Kokosová drť	41
Obr. 20: Konopné vlákno	42
Obr. 21: Viskózní vlákno	42
Obr. 22: Čedičová stříž	43
Obr. 23: Čedičové vlákno	43
Obr. 24: Rozmíchaná směs Baucisu a vláknenného plniva (konopí).....	44
Obr. 25: Forma pro trámečky 30x30x200 mm.....	45
Obr. 26: Forma pro malé trámečky 10x10x150 mm ze silikonu	45
Obr. 27: Uspořádání zatěžování zkušební tělesa dle normy ČSN EN 12390-5.....	49
Obr. 28: Uspořádání zatěžování při zkoušce pevnosti v tahu ohybem.	50
Obr. 29: Měřicí přístroj INSTRON – LabTest II	51
Obr. 30: Fotka z průběhu testu - Porušení vzorku s cementovou matricí a plnivem z kokosových vláken.....	51

Obr. 31: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa dle normy ČSN EN 12390-3.....	58
Obr. 32: Uspořádání zatěžování při zkoušce pevnosti v tlaku - Beton	58
Obr. 33: Zkušební přístroj P100 – LabTest II	59
Obr. 34: Uložení vzorku při zkoušce rázem [32]	64
Obr. 35: Funkce Charpyho kladiva [32]	65
Obr. 36: Měřicí přístroj Zwick / Roell HIT50P	65
Obr. 37: Uložení vzorku v přístroji Zwick / Roell HIT50P	66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání chemického složení konopí a lnu v procentech [23]	31
Tabulka 2: Struktura elementárních vláken konopí a lnu [23].....	32
Tabulka 3: Chemické složení kokosu v procentech [23].....	32
Tabulka 4: Vlastnosti cementu 42,5R dle normy EN 197-1.	39
Tabulka 5: Hmotnostní díly jednotlivých složek	40
Tabulka 6: Hmotnostní díly plniv	40
Tabulka 7: Přehled použitých plniv	40
Tabulka 8: Výsledky objemové roztažnosti	47
Tabulka 9: Průměrná mez pružnosti v tahu.....	56
Tabulka 10: Průměrná tažnost.....	57

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Znázornění výsledků objemové roztažnosti	48
Graf 2: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Čedičové vlákno.....	52
Graf 3: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Dřevo.....	52
Graf 4: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Konopí.....	53
Graf 5: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Kokosové vlákno.....	53
Graf 6: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Kokosová drť	54
Graf 7: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Viskózové vlákno.....	54
Graf 8: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Polyesterové vlákno	55
Graf 9: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Čedičové vlákno.....	60
Graf 10: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Dřevo.....	60
Graf 11: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Konopné vlákno	61
Graf 12: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Kokosové vlákno	61
Graf 13: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Kokosová drť	62
Graf 14: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Viskózové vlákno.....	62
Graf 15: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Polyesterové vlákno	63
Graf 16: Výsledky zkoušky houževnatosti - Čedičové vlákno	67
Graf 17: Výsledky zkoušky houževnatosti - Dřevo	67
Graf 18: Výsledky zkoušky houževnatosti - Konopné vlákno.....	68
Graf 19: Výsledky zkoušky houževnatosti - Kokosové vlákno	68
Graf 20: Výsledky zkoušky houževnatosti - Kokosová drť	69
Graf 21: Výsledky zkoušky houževnatosti - Viskózové vlákno	69
Graf 22: Výsledky zkoušky houževnatosti - Polyesterové vlákno.....	70

SEZNAM ZKRATEK

CO_2 – Oxid uhličitý

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – hydroxid vápenatý

CaO – Oxid vápenatý

SO_3 – Oxid sírový

SiO – Oxid křemnatý

Al_2O_3 - Oxid hlinitý

MgO – Oxid hořečnatý

Si – křemík

Al – hliník

O – kyslík

H_2O – voda

SiO_2 – oxid křemičitý

NaOH – hydroxid sodný

Na_2CO_3 – kyselina sodná

Ca – vápník

C-S-H - Calcium-Silicate-Hydrate / Vápník-silikát-hydrát

C-A-H – Calcium – Aragonit – Hydrate / Vápník – Uhličitan vápenatý - hydrát

Mg – hořčík

Na - sodík

K - draslík

K_2CO_3 – uhličitan draselný

KOH – hydroxid draselný

Me_2O – obsah alkálií

Fe_2O_3 – oxid železitý

CH_2 - methylen

Li – lithium

OPC hydratace

MgFe – magnezium železo

Na_2O – oxid sodný

1 Úvod

Ačkoliv člověk tvoří mnoho objevů pomocí různých prostředků, nikdo nezvládne nic krásnějšího, jednoduššího a přesnějšího než příroda, protože v jejích výtvorech nic nechybí a nic nepřebývá.

– Leonardo da Vinci

Díky neustále se zvyšující lidské populaci a jejímu rychlému vývoji roste stejně rychle i spotřeba materiálů a surovin, které jsou z velké většiny dále nerecyklovatelné a zůstávají tak jako průmyslové odpady. Zejména u anorganických odvětví (např. slévárenství a stavební průmysl) jsou tyto materiály produkovány v řádech tisíců tun ročně. S růstem výroby je spojeno zvyšování těžby vstupních surovin a tak i zvýšení produkce následných odpadů vznikajících při jejich těžbě. V současnosti proto roste snaha o zdokonalování technologických postupů při těžbě i výrobě, snižování energetických nároků a především snižování emisí CO₂. Proto se s co největší možností nabízí k využití odpadů jako druhotných surovin.

Geosilikáty jsou nové materiály použitelné pro povlaky a lepidla, nová pojiva pro kompozity, odpadní zapouzdření a nové cementové pojivo pro betony. Vlastnosti a použití geopolymérů jsou předmětem zkoumání v mnoha vědeckých a průmyslových oborech: moderní anorganická chemie, fyzikální chemie, koloidní chemie, mineralogie, geologie a ve všech typech inženýrství zpracovatelských technologií.

Geopolymer přilákal intenzivní výzkum po celém světě, protože při zpracování uvolňuje méně CO₂, až devětkrát méně než Portlandský cement. To jednoduše znamená, že v nově industrializovaných zemích sníží šest až devět krát emise CO₂, než cement při výstavbě infrastruktury a použití ve stavebnictví.

Jelikož je geopolymer stále pro masové použití drahý, je nutné přidávat další plnivo a tím snižovat celkovou cenu. Jedním z nejlevnějších a nejekologičtějších způsobů je přidání přírodních odpadních surovin.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Geopolymer

Polymery jsou přírodní nebo syntetické látky, v jejichž veliké molekule (makromolekule) se jako článek v řetězu mnohonásobně opakuje základní stavební monomerní jednotka. Pod pojem „polymery“ neřadíme pouze syntetické organické makromolekulární látky, jako jsou plasty, nebo přírodní materiály (organické či hybridní anorganicko-organické biopolymery), ale i čistě anorganické látky přírodní či technogenní, jejichž vznik a příprava je založena rovněž na polymeraci či polykondenzaci. Důležitou skupinou těchto materiálů převážně trojrozměrné struktury jsou geopolymery. Pod pojmem geopolymer se skrývají anorganické uměle vyrobené materiály, které jsou připravovány pomocí hlinitokřemičitého pojiva na bázi metakaolinu a aktivátorem z vodního skla, popř. z alkálií za normální teploty a tlaku. [1]

Tato specifická reakce se speciálními vstupními hodnotami byla profesorem Davidovitem v roce 1972 označena jako geopolymerace. F. Škvára uvádí ve své práci, že lze využít řadu odpadních surovin (především se jedná o elektrárenské a teplárenské popílků) a přeměnit je na vhodné geopolymerní materiály. Geopolymery jsou na první pohled téměř nerozeznatelné od přírodního kamene, ale vlastnostmi jej v různých směrech při vhodném namíchání jednoznačně předčí. Nabízejí se zde totiž díky své výborné adhezi úžasné možnosti modifikací plnivy a dosažení jedinečných kombinací vlastností, díky nimž materiál může přežít i tisíciletí. Patří k nim především vysoká pevnost v tlaku, odolnost vůči kyselým dešťům, ohni i dokonce bakteriím.[2]

2.1.1 Vznik a historie geopolimerů

První období vzniku a především použití umělého kamene je už v době starých civilizací, jako jsou Mezopotámie a Egypt, v době před 2000 př.n.l. Z nalezených písemností a pozůstatků je zřejmé, že tyto pokročilé civilizace využívaly základní metody na výrobu umělého kamene v Egyptě a v Mezopotámii. Tyto artefakty v podobě soch a kamenného nádobí mají i po několika tisících let hladký a lesklý povrch bez stop po nástrojích, což není především z chemického hlediska možné. Důkazy na těchto artefaktech však ukazují, že starí umělci věděli a experimentovali s možnostmi převést strusky a minerály obsažené v různých rudách v minerální pojivo pro výrobu soch, které nebylo možné vytesat z kamene, ale tvořili je ve formách. [3]

Novodobé poznatky nasvědčují tomu, že stavitelé ve starém Egyptě používali při stavbách monumentálních soch a staveb vyspělou technologii, která využívala dostupných přírodních zdrojů (vápenec, voda, jíl, soli) k výrobě geopolymerního betonu. Obrovské a neuvěřitelně přesné tvárnice pro stavbu pyramid dělníci nejspíše neotesávali z kamenných kvádrů vytěžených v lomech Toura a Maadi poblíž Gízy, nýbrž je museli tvořit z kamenné kaše, kterou ve velkém množství míchali v mělkých písečných nádržích a poté vylévali a pěchovali do předem připraveného dřevěného šalování. Tvárnice použité na stavbu pyramid obsahují 93-97 % přírodního vápence, zbytek tvoří pojivo. V něm převažuje kaolinitický jíl z vápence v Gíze, nejdůležitější je přídavek žíravé sody (tu získávali ze spalování palmového dřeva a natronové soli), která tuto kamennou kaši pojila a působila jako geologické lepidlo. Egyptanům se takto dost pravděpodobně náhodou podařilo vytvořit geopolymerní cement chemicky srovnatelný s přírodním kamenem. To je základní důvod, proč geologové dnes nemohou klasickou metodou krystalografické analýzy rozlišit přírodní vápenec od geopolymerního vytvořeného.[3]

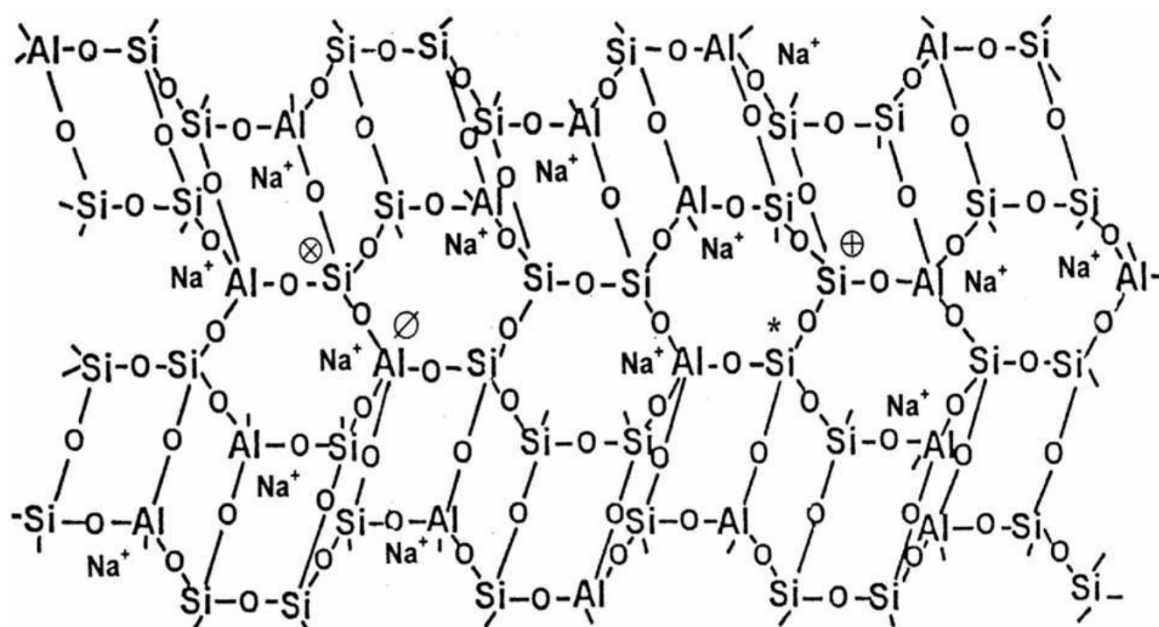
2.1.2 Popis geopolymerních materiálů

Pojmem geopolimer jsou označovány materiály, jejichž společným znakem je základní amorfní trojrozměrná mikrostruktura s nahodilým uspořádáním křemičitanových a hlinitanových tetraedrů s kationem alkalického kovu. Výsledky dosud publikované umožňují prohlásit, že geopolymerní materiály [4]:

- nemají monolitickou strukturu typu polysialát-siloxovou
- alkalický kationt (K,Na) je přítomen ve struktuře v solvované formě, je vázán slaběji než v krystalické struktuře zeolitů (tento fakt proto vede k potenciální možnosti tvorby výkvětů)
- je charakterizován svým náhodným trojrozměrným uspořádáním
- je typickým pórovitým materiálem s póry o velikosti od nanometrů po mikrometry
- voda zde hraje zásadní roli nosiče alkalického aktivátoru a je zároveň produktem polykondenzace
- krystalické a amorfní hydráty se objevují pouze při příměsi strusky, nebo v materiálu bohatém na vápník

Mechanismy tvořící zesíťení při tuhnutí geopolymerních materiálů nejsou stále ještě zcela objasněny, stejně tak není dokonale popsána reakční kinetika. Je ale známo, že geopolymerní novotvary vznikají z roztoků, kde jako první krok musí být rozklad (rozpuštění) základního aluminosilikátu, převedení jeho co největší části na roztok. V silně alkalickém prostředí při pH 13-14 probíhá rozklad relativně rychle, poté v dalším kroku je polykondenzace vzniklých křemičitanových a hlinitanových tetraedrů. Ty se vzájemně prováží pomocí kyslíkových atomů na vrcholech tetraedrů do trojrozměrné struktury amorfního geopolymerního gelu a ten následně postupně ztuhne v geopolymer. [5]

Základní strukturní model vypracoval Davidovits na alkalické aktivaci metakaolinu, kde v tomto modelu předpokládá monolitický polymer podobný organickému polymeru. [6]



Obr. 1: Davidovitsův základní model geopolymerní struktury [9]

2.1.3 Výroba

Obecně se geopolymery vyrábějí vhodnou alkalickou aktivací různých materiálů, jakými jsou především odpadní materiály typu elektrárenský popílek či strusky. V největším měřítku se zkoumají a využívají jejich různě připravené směsi s plnivý (kamenivem a výztuží) ve snaze získat kombinaci s nejlepšími vlastnostmi.

Na světě dnes už existují ložiska základní suroviny pro výrobu geopolymérů, která se nemusejí aktivovat, tedy tepelně zpracovávat při teplotě 600-700 °C. Výhodou je, že při získávání této základní suroviny pro geopolymery nevznikají již žádné zbytečné emise. V tuto chvíli jsou známá dvě taková ložiska. První se nachází v Austrálii, druhé u nás v České republice.

To je český trumf pro ekologickou výrobu geopolymérů, kterou představují haldy lupku poblíž Zbůhu u Plzně. Lupek je odpad vznikající při těžbě černého uhlí. Původně se tento lupek nacházel ve slojích (vrstvách) nad vrstvami uhlí. Protože jde o materiál málo kompaktní, který by se při dobývání uhlí na horníky zřítíl, bylo proto nutné ho odtěžit. Tuto směs kaolinů a jílu s poměrně velkým množstvím organických látek navezli na haldy, jejichž výška dosahovala až 70 metrů.

Na haldách došlo k samovznícení materiálu a z odpadu se stala výrobní surovina. Na haldách je toho tolik, že by to dokázalo nahradit poptávku po cementu pro celou Českou republiku zhruba na 20 let. Přesto v nejbližší době půjde jen o doplněk k výrobě klasického cementu, byť je geopolymér výslednou kvalitou nesrovnatelně lepší a ekologicky významný, ale cenově méně dostupný. [7]

2.2 Mechanismus alkalické aktivace a struktura geopolymu

2.2.1 Alkalická aktivace

Alkalická aktivace je složitý proces vedoucí ke vzniku produktu odlišného svou mikrostrukturou od cementů, který způsobuje zejména vysokou odolnost proti působení agresivních látek. Významný vliv na výsledné mechanické vlastnosti má druh a koncentrace použitého alkalického aktivátoru. Funkce alkalicky aktivovaného aluminosilikátového pojiva je založena na reakci mezi aluminosilikátem (metakaolinem) a aktivátorem obsahujícím sodnou či draselnou sloučeninou. Při reakci aluminosilikátové látky v silně alkalickém prostředí dochází zejména k rozrušení Si-O-Si vazeb. Dalším podstatným rysem v této reakce je průnik atomů Al do původní Si-O-Si struktury.

Jejich složení lze vystihnout základním vzorcem $(M_n\{-(Si-O)_Z-Al-O\}_n \cdot wH_2O)$ Kde M je prvek K, Na či Ca, index n je stupeň polykondenzace a index z je 1,2,3 nebo více než 3. V závislosti na vstupních látkách a podmínkách reakce mohou vznikat C-S-H a C-A-H fáze. V těchto reakcích (polykondenzačního charakteru) může vznikat i sekundární H_2O . Podle charakteru vstupních surovin a podmínek reakce mohou vytvářet amorfni (gelové) nebo částečně amorfni nebo krystalické látky. Při procesu alkalické aktivace hraje značnou roli koncentrace pevné látky. Ve značně zředěných suspenzích (index w větší než 1-10) vznikají převážně krystalické produkty typu zeolitů (analcim, Hydrosodalit a další). Tento postup se používá pro syntézu umělých zeolitů. Při vyšších koncentracích pevné fáze v suspenzi (w nižší než 1) se vytvářejí převážně amorfni produkty. [8]

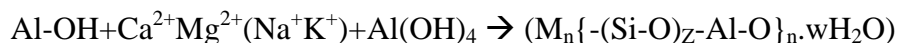
Proces alkalické aktivace:



(Porušení vazeb Si-O-Si v silně alkalickém prostředí)



(neutralizace silanolátové skupiny)



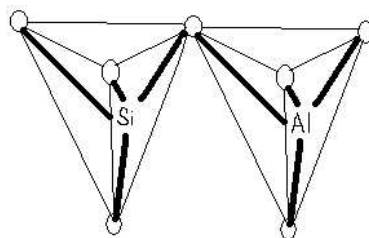
(kde M je K, Na či Ca, n je stupeň polykondenzace a z je 1,2,3 nebo více) [8]

Geopolymer pak může mít jednu ze tří základních forem podle poměrů Si/Al (Davidovits 1999) [8]

1. *Polysialáty* :

Si /Al = 1

(-Si-O-Al-O-)

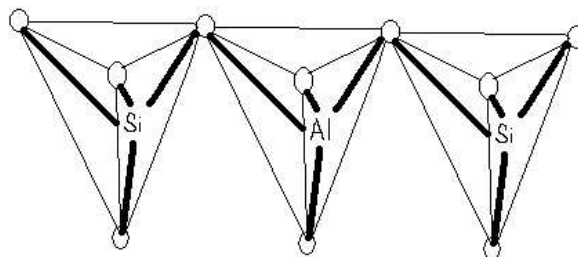


Obr. 2: Prostorové uspořádání PS [3]

2. *Polysiloxo-sialáty* :

Si /Al = 2

(-Si-O-Al-O-Si-O-)

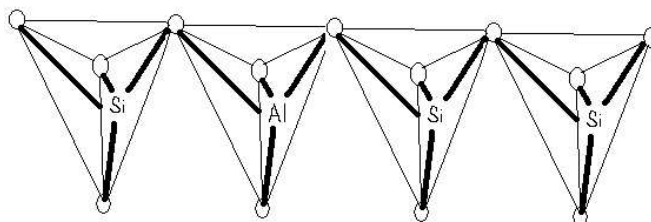


Obr. 3: Prostorové uspořádání PSS [3]

3. *Polydisiloxo-sialáty* :

Si /Al = 3

(-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-)



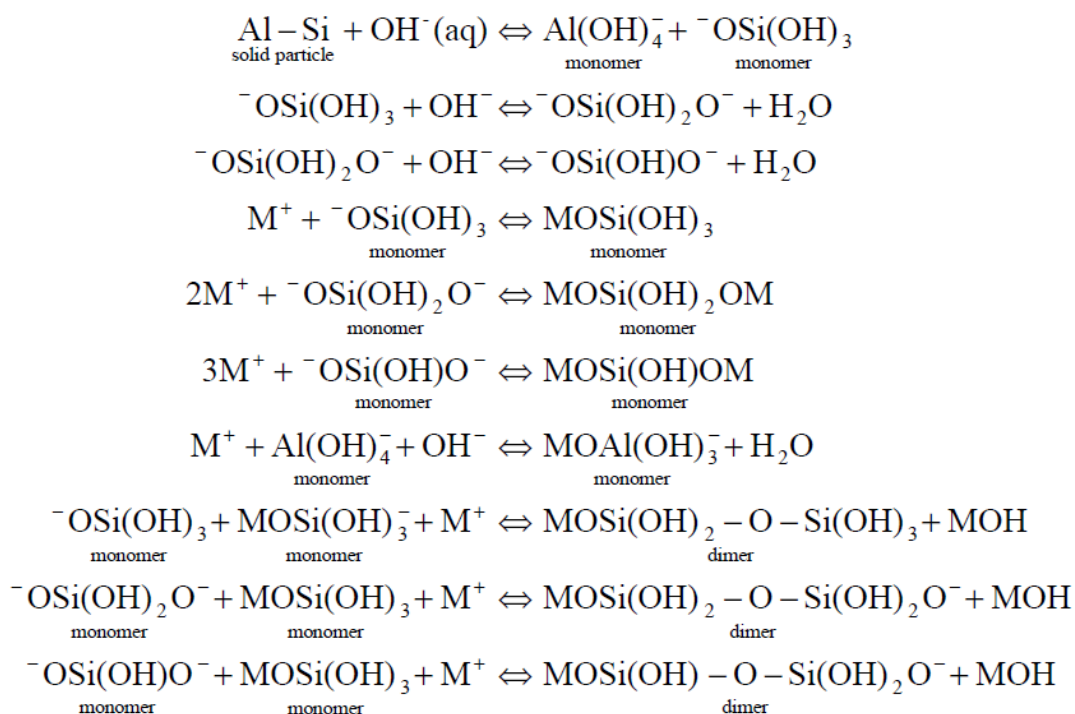
Obr. 4: Prostorové uspořádání PSDS [3]

2.3 Geopolymerace – alkalická aktivace a polykondenzace

Už ve starověku byly uměle vytvořené kameny připravovány mícháním kaolinitu, dolomitu nebo vápence s Na_2CO_3 nebo K_2CO_3 (získávaného např. ze solných jezer) a siliky. [10]

Smícháním ve vhodném poměru s vodou vznikl NaOH nebo KOH, který rozpustil část siliky a silně reagoval s dalšími přísadami za vzniku geopolymerního pojiva. [10]

Proces nazývaný geopolymerace začíná rozpouštěním Al-Si materiálů v alkalickém roztoku (NaOH, KOH), a vzniká $[\text{M}_x(\text{AlO}_2)_y(\text{SiO}_2)_z \cdot n\text{MOH} \cdot m\text{H}_2\text{O}]$ gel, poté dle popisu níže nastává tuhnutí a tvrdnutí gelu za vzniku geopolymery (viz Obr. 5). [9]



Obr. 5: Navrhovaný mechanismus rozpouštění a následné kondenzace hlinitokřemičitanů [8]

2.3.1 Alkalické aktivátory

Nejčastější aktivátory jsou na bázi roztoku hydroxidu sodného a křemičitanu sodného, aktivátory na bázi draslíku jsou používány už méně, a to zejména pro vyšší pořizovací cenu. Důvodem použití draselných aktivátorů, spíše než sodných, je především to, že tyto aktivátory významně snižují tvorbu výkvětů na povrchu geopolymery. Při alkalické aktivaci je vhodné, aby molární koncentrace obsažené alkalické složky byla přibližně stejná jako složka hlinitá. Je-li molární hmotnost značně vyšší, může během tuhnutí

docházet k bobtnání kompozitu díky tvorbě hydrátu křemičitanu sodného (tzv. alkalické rozpínání). Zásadní význam zde hraje také množství obsažené vody, kdy při požadovaných vyšších pevnostech kompozitu, je vhodné pracovat s nízkým procentem vodní složky. [12]

2.3.1 Hydroxid draselný

Hydroxid draselný v čistém stavu je světlá, silně navlhavá, pevná látka mající hustotu přibližně 2.04 g/cm³. Je rozpustný ve vodě, 1 g KOH se rozpustí v 0,5 g vody, a v slabších alkoholech jako methanol, ethanol a butanol. Při rozpouštění ve vodě dochází k silné exotermní reakci produkující značné množství tepla, vedoucího ke zvyšování teploty roztoku někdy až přes 100°C. Hydroxid draselný vytváří stabilní hydráty, jako jsou monohydrát KOH·H₂O, dihydrát KOH·2H₂O a tetrahydrát KOH·4H₂O. Je to důležitá chemická sloučenina, která tvoří silně zásadité roztoky s vodou a ostatními polárními rozpouštědly, schopné zneutralizovat mnoho druhů kyselin a rozložit některé anorganické látky na organický materiál. Jelikož je KOH silná zásada, má korozivní účinky na organiku, včetně živých vláken. Hydroxid draselný se průmyslově vyrábí obdobně jako hydroxid sodný elektrolýzou vodného roztoku chloridu draselného. [12]

2.3.2 Vodní sklo

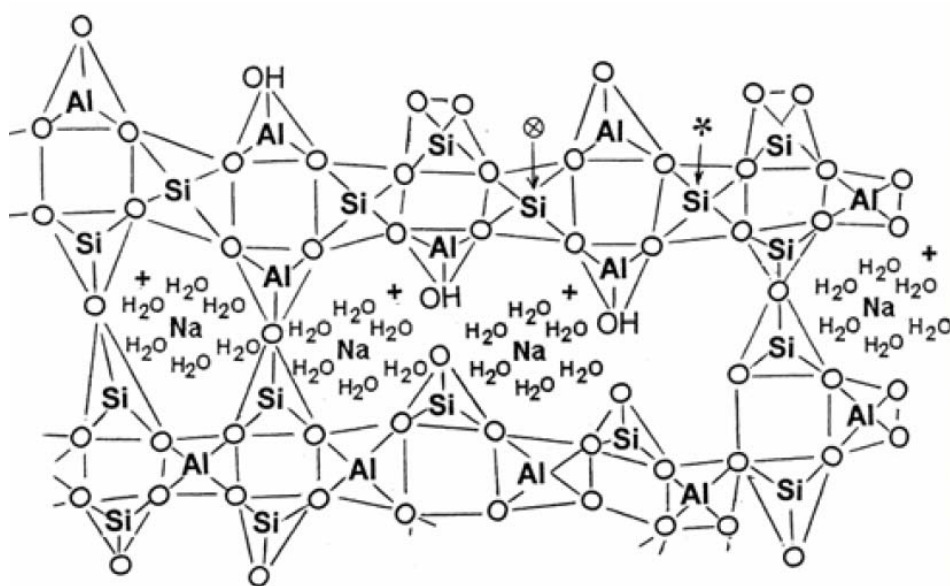
Vodní sklo je vodný koloidní roztok alkalického křemičitanu (sodného, draselného a někdy i lithného), vzniká rozpuštěním příslušného alkalicko-křemičitého skla ve vodě. Jeho obecný vzorec je $\text{Me}_2\text{O} \cdot m \text{SiO}_2 \cdot n \text{H}_2\text{O}$. Velikost částic u běžně používaných vodních skel se pohybuje v rozmezí 1-500 nm. Tyto částice jsou samostatnou fází oddělenou disperzním prostředím, což je v tomto případě voda. Soustavu lze také malým zásahem destabilizovat a převést přes formu gelu až na pevnou látku. Výroba vodního skla jako taveniny probíhá v podstatě stále stejným způsobem, jak jej objevil mnichovský profesor mineralogie J. N. von Fuchs v roce 1818. Výroba se v průmyslovém měřítku provádí v rotačních nebo taky stacionárních autoklávech za zvýšené teploty a tlaku.

Složení vodního skla bývá nejčastěji určováno křemičitým modulem m , což je molární poměr $\text{SiO}_2/\text{Me}_2\text{O}$, kde Me^+ je kationt alkalických kovů nejčastěji Na^+ , K^+ , Li^+ a NH_4^+ . Křemičitý modul se vypočte z hmotnostního poměru složek ($\text{hmotn.\% SiO}_2 / \text{hmotn.\% Me}_2\text{O}$) vynásobeným koeficientem, který se liší v závislosti na složení,

křemičitan sodný (1,032), křemičitan draselný (1,569), křemičitan lithný (0,498) a hodnoty u běžně vyráběných typů vodního skla leží v rozmezí 2,0-3,7. Křemičitý modul m lze dle potřeby upravovat jak směrem nahoru, tak také směrem dolů. Modul m lze zvýšit rozpouštěním amorfního oxidu křemičitého ve vodním skle. Na druhou stranu k jeho snížení můžeme použít například hydroxid sodný nebo roztok vodního skla o nižším molárním poměru. Vedle křemičitého modulu se k charakterizování vodního skla dále používá nejčastěji hustota, která poskytuje informaci o koncentraci roztoku i složení výchozího skla, viskozita a rovněž hodnota pH. Viskozita vodního skla především závisí na jeho koncentraci a na hodnotě křemičitého modulu výchozího skla. Vodní skla, jakožto roztoky silné zásady a slabé kyseliny, jsou silně alkalická. Vodní sklo se používá i jako lepidlo, přísada do různých odmašťovacích prací a čistících prostředků a také jako pojivo při výrobě pískových forem ve slévárnách. [13]

2.3.3 Struktura geopolymery

Geopolymery mají trojrozměrnou amorfni mikrostrukturu, v níž jsou silikátové a aluminátové tetraedry vzájemně nepravidelně vázány polykondenzací přes kyslíkový můstek. Platí zde také Loewensteinovo pravidlo, které nám říká, že spojování tetraedrů, které v jádře obsahují hliník, je zakázáno. Takovéto tetraedry mohou být propojeny pouze přes minimálně jeden tetraedr, který ve svém jádře obsahuje křemík. Z toho vyplývá, že dialuminátový aniont $-\text{Al}-\text{O}-\text{Al}-$ neexistuje. Tímto pravidlem je daný maximální poměr mezi Al:Si a je rovný 1:1. [10]



Obr. 6: Současný pohled na Barbarosovu strukturu geopolymery [10]

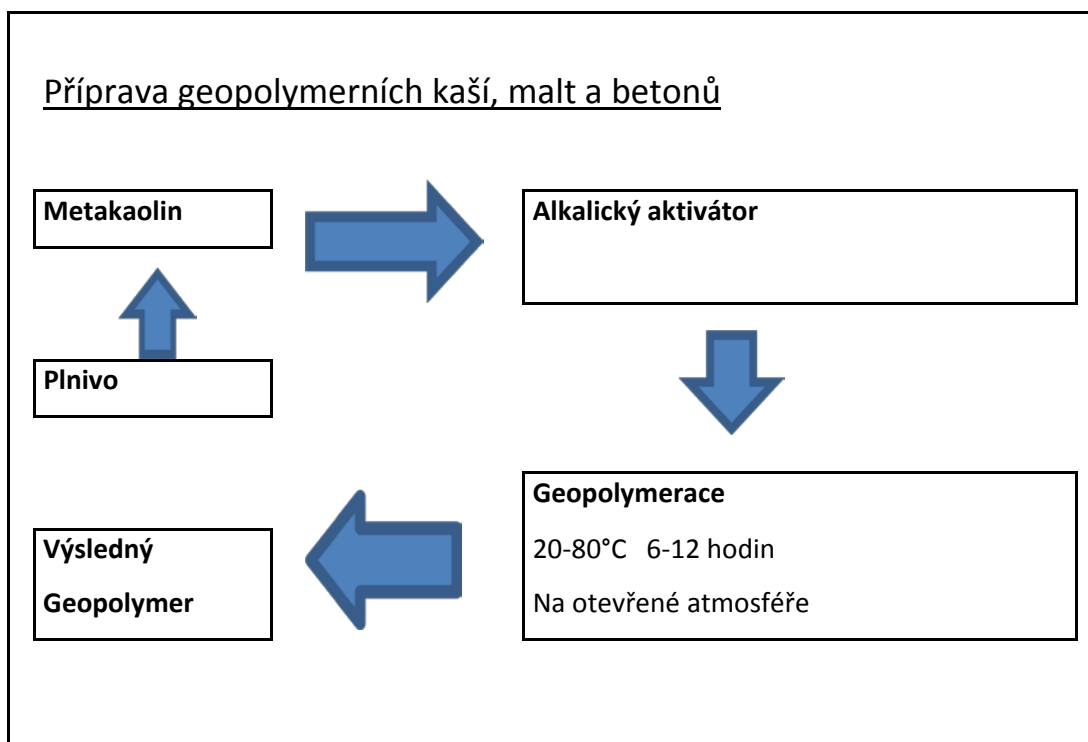
Barbarosův model vychází z výsledků získaných pomocí spektroskopie, která prokázala, že geopolymerní materiály mají podobná spektra jako alumino-silikátová skla. Geopolymerní materiály vykazují trojrozměrné uspořádání. Liší se tím, že ve struktuře skla není přítomna voda ani póry. [9]

2.4 Příprava geopolymérů

Teorie na přípravu geopolymérů se značně liší. V podstatě jsou známy dva základní postupy míchání polymerů. První postup preferuje nejprve smíchat pevné složky směsi, aktivátor připravit odděleně a následným smícháním těchto dvou složek směs aktivovat. Druhý způsob přípravy doporučuje obecně míchat směs v určitém pořadí metakaolin, hydroxid, vodní sklo a strusku. Nezávisle na přidání složek je pro správný průběh chemické reakce důležitá homogenizace.

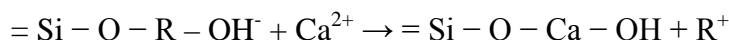
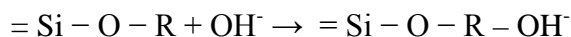
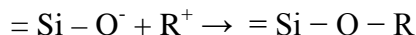
Příprava geopolymerních směsí se může značně lišit v závislosti na složení a vlastnostech aktivovaného materiálu. Obecně však platí, že chemická reakce, která probíhá při tvorbě geopolymérů, probíhá v roztoku a tím je ovlivněn postup při přípravě těchto materiálů. V prvním kroku musí dojít k rozpuštění aktivované složky v silné alkálii (nejčastěji hydroxid alkalických kovů), přičemž rozpouštění se provádí při normální teplotě. V druhém kroku se přidává vodní sklo a známém silikátovém modulu, aby byl dosažen obsah alkálii. Poté se přidávají ostatní složky – plniva, příměsi, které zlepšují zpracovatelské vlastnosti i mechanické charakteristiky výsledného materiálu. [10]

Schéma přípravy geopolymerních materiálů



2.4.1 Reakční mechanismus

Glukhovskiy (1967) a Krivenko (1994) navrhli model, který vysvětloval alkalickou aktivaci materiálů obsahujících křemík a vápník, jako je vysokopepní struska pomocí níže shrnutých sérií reakcí:

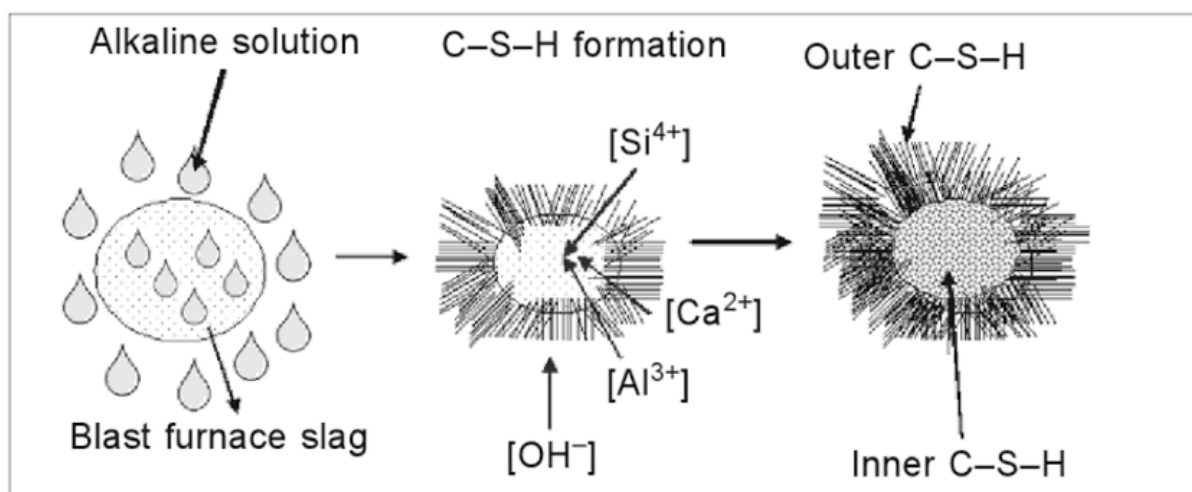


Alkalický kationt (R^+) se chová jako pouhý katalyzátor v úvodní fázi hydratace kationtovou výměnou s ionty Ca^{2+} . Stejní autoři věřili, že s postupem reakce budou alkalicky kationty převzaty do struktury. [11]

Fernández Jiménez (2003) uvedl, že povaha aniontu v roztoku je také nápomocen při aktivaci, zejména v raných dobách a obzvlášť jako pojivo. [11]

Alkalická aktivace strusky vytváří část komplexního procesu, který probíhá na etapy, během nichž po rozrušení strusky následuje polykondenzační reakce produktu. Většinovým produktem reakce, vytvořeným hydratací portlandského cementu, je gel typu C-S-H, jemuž materiál primárně vděčí za své mechanické vlastnosti. Mezi druhotné produkty patří portlandit, ettringit a monosulfoaluminát kalcia. Je to podobný proces jako u alkalických cementů. Hlavní produkt reakce, gel (jehož složení a struktura se liší v závislosti na standardním C-S-H, generovaném během hydratace OPC), se tvoří zároveň s řadou druhotných produktů. Typ vzniklého druhotného produktu závisí na počátečním složení materiálu, typu aktivátoru a koncentrace, pH aj.

Obrázek porovnává nejběžnější produkty reakce, vzniklé při běžné hydrataci portlandského cementu, s produkty alkalické aktivace cementu. [11]



Obr. 7: Teoretický model reakčního mechanismu v alkalicky aktivované strusce [14]

2.5 Hybridní kompozitní materiály

2.5.1 Definice kompozitních materiálů

Kompozitní materiál se obvykle skládá ze dvou nebo více odlišných fází. Tyto fáze jsou vzájemně nerozpustné a mají odlišné chemické složení. Kompozitem lze nazývat materiál, který splňuje tyto tři základní podmínky [15]:

- materiál obsahuje různé složky v dostatečné velikosti, větší než 5%,
- fáze jednotlivých složek mají různé vlastnosti a v důsledku toho má výsledný kompozit výrazně odlišné vlastnosti od vlastností přítomných složek systému,
- kompozitní systém vzniká mícháním a spojováním jednotlivých složek různými způsoby a prostředky.

Základem každého kompozitního materiálu je matrice neboli tzv. pojivo. Je to spojitá fáze kompozitního systému. Do matrice se přidává nespojitá fáze, která představuje plnivo neboli výztuž. S ohledem na typ matrice (kovová, polymerní atd.) se kompozity dělí na několik základních skupin [15].

Plnivem dvousložkových systémů mohou být různé formy částic nebo vláken. Druh částic plniva, jejich velikost a distribuce ovlivňují výrazným způsobem vlastnosti kompozitního materiálu. Na vlastnosti systému má vliv délka a objem vláken plniva, jejich orientace a adheze k matrici.

2.5.2 Charakteristika hybridních systémů

Trendy v oblasti zlepšování vlastností stávajících kompozitů směřují k vývoji a rozvoji tzv. hybridních kompozitních materiálů. Termín hybridní materiál je používán pro různé druhy systémů zahrnující širokou oblast materiálů.

Mezi hybridní kompozity zahrnujeme materiály, u kterých:

- jedna z matic obsahuje různé typy plniva, tj. směs vláknového i částicového plniva,
- dochází ke kombinaci více druhů složek v jedné matrici, vytváří se směs několika matic,
- jsou kombinované obě předchozí možnosti. [16]

Možnosti spojování různých druhů materiálů s odlišnými vlastnostmi umožňují vytvářet nové systémy různých mechanických charakteristik. Dochází ke zvýšení pevnosti, tuhosti i houževnatosti, ke snížení hmotnosti, případně nákladů na výrobu. Tyto

a další vlastnosti dávají hybridním kompozitům možnosti širokého využití, především ve stavebním, automobilovém, ale i leteckém, lodním a dokonce i kosmickém průmyslu.

Vývoj v oblasti hybridních kompozitních materiálů se zaměřuje i na studium vlastností a chování anorganicko-organických kompozitů. Základem těchto kompozitních materiálů je matrice obsahující většinou dvě složky, které se smísí na molekulární úrovni. Jedna z nich je organického a druhá anorganického původu. Existuje ale řada přírodních materiálů, které mají různá složení a rozmístění organických a anorganických částí o velikosti nanometrů. V převážné většině případů poskytuje anorganická část materiálu zvýšenou mechanickou pevnost a celkovou strukturu, zatímco organická část slouží ke zlepšení spojení anorganických stavebních částí. Typickým příkladem těchto kompozitních materiálů v přírodní podobě jsou kosti nebo perleť [17].

2.6 Použité materiály k přípravě matrice

2.6.1 Metakaolin

Metakaolin je materiál vyráběný z kaolinitických jíílů, který se získává především tepelnou úpravou v rozmezí teplot 650 – 800 °C. Dalším ze zdrojů mohou být i kaly z recyklovaného papíru. Hlavními složkami jsou Al_2O_3 a SiO_2 . Metakaolin má i také pucolánové vlastnosti, což znamená, že získává vlastnosti reakcí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ s vlhkostí a vznikají kalciumsilikáty a alumináty. Metakaolin na sebe váže alkálie a vykazuje velkou mechanickou a chemickou odolnost a zvyšuje odolnost výsledného povrchu proti působení vody a agresivnímu prostředí. Metakaolin se někdy používá jako náhrada za část cementu. Další použití najdeme u omítek, malt či betonových směsí, ale také se používá jako složka do alkalicky aktivovaných materiálů. [18]

2.6.2 Portlandský cement

Název portlandský cement pochází od anglického města Portlandu, v jehož okolí se dříve těžil kámen, připomínající svým vzhledem výrobky z cementu. Portlandský cement byl poprvé použit a vyroben ve Velké Británii počátkem 19. století. Patentován byl Britem Josephem Aspdinem v roce 1824. Obsahuje jemně rozemletý křemičitanový slínek a přísady jako např. sádrovec. Dále může obsahovat různé pucolánové látky, jako jsou např. granulovaná vysokopecní struska, popílek, vápencová moučka nebo láva. Po smíchání s vodou vytváří hustou kaši, která tuhne a poté tvrdne v důsledku hydratačních

reakcí a procesů. Rychlost těchto procesů závisí na teplotě. Po ztvrdnutí zachovává cement svoji pevnost a stálost. [19]

Spadá mezi tzv. prášková hydraulická pojiva anorganického původu. Jsou charakterizována tím, že po rozdělání s vodou tuhnou, tvrdnou a dosahují určitých pevností, a to nejen na vzduchu, ale také pod vodou. Cement je tvořen slínkem, jež vzniká výpalem směsi. Ta se poté po chemické stránce sestává ze čtyř hlavních oxidů, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Tyto oxidy spolu během výpalu reagují a vznikají tzv. slínkové minerály, popřípadě další doprovodné složky. Mineralogickým složením slínku definuje jeho fyzikálně chemické vlastnosti.

Portlandský cement je dnes základní složkou všech moderních hydraulických pojiv, na která se vztahuje evropská norma EN ČSN 197-1. Portlandský cement se skládá ze dvou hlavních složek, jsou to portlandský slínek a síran vápenatý. Slínek vzniká při pálení směsi přírodních nebo průmyslových surovin jako jsou vápenec, jíla, pyritové výpražky, atd. a následně se mele ve mlýně. Takto pomletý slínek však reaguje rychle s vodou, to znamená, že nemůže být v praxi sám o sobě používán, protože by nebylo možné beton zpracovat. Tuhnutí cementu je proto potřeba regulovat, proto se ke slínku přidává vhodné množství (3,5–4 % SO_3 podle pevnostní třídy cementu) síranu vápenatého ve formě sádrovců nebo anhydritu. Výsledné vlastnosti portlandského cementu můžeme podle způsobu výroby a složení měnit ve velmi širokých mezích. Vlastnosti cementu se pak dají přesně upravit v závislosti na aplikacích. [20,21]

2.6.3 Voda

Voda v betonářské technologii plní dvě hlavní funkce:

- hydratační - voda podmiňuje hydrataci a rehydrataci cementu a tak spolu s cementem vytváří pevnou strukturu cementového kamene, minimální spotřeba vody na hydrataci cementu je přibližně 23 až 25 % hmotnosti cementu,

- reologickou - voda umožňuje betonu vytvořit tvárnou hmotu ve spojení s jeho složkami. Kapilárními silami je zajišťována koheze a viskozitou plastičnost betonu.

Technologicky vodu rozdělujeme na tzv. záměsovou (dávkováná při míšení betonu)

a na ošetřovací (voda dodávaná betonu po několik dnů pro udržení betonu ve vlhkém stavu). Voda musí vyhovovat kvalitativním požadavkům betonu. Vhodnost zdroje vody pro výrobu betonu obecně závisí na použitelnosti.

Zdroje vody mohou být:

- běžná pitná voda je použitelná bez jejího zkoušení,

- recyklovaná voda, používaná při uzavřeném technologickém cyklu na výrobu transportbetonu běžně vyhovuje, denně je pak třeba měřit její objemovou hmotnost, která by měla být do $1010 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Vyšší objemová hmotnost má vliv na vyšší podíl cementového kalu, který je pak třeba nechat déle sedimentovat,
- přírodní podzemní a povrchová voda by měly být testována před jejím prvním použitím,
- průmyslovou odpadní vodu lze také použít, ale musí splňovat jistá kritéria, může mít totiž proměnné vlastnosti,
- mořská voda je také použitelná na prostý beton, ale není vhodná pro beton s železnou armaturou a předpjatý beton. Součet obsahu chloridových iontů ve vodě, v cementu a v kamenivu nesmí překročit určitou hodnotu,
- splašková voda je pro výrobu betonu nepoužitelná. [22]

2.7 Použitá organická plniva

Jedná se především o materiály, které vznikají z plodů nebo ze stonků rostlin. Následně jsou vhodnou technologií dále zpracovány pro další průmyslové využití. U těchto organických plniv se nemění struktura pomocí chemických procesů, jsou tedy používána v původním stavu jako celulózová, keratinová, fibroinová.

2.7.1 Konopí

Jeho použití především v Číně sahá až do 2800 let p.n.l. Pěstuje se také v řadě států Evropy. Jeho vlákna ze stonku jsou hrubší, tmavší a pevnější než vlákna ze lnu.

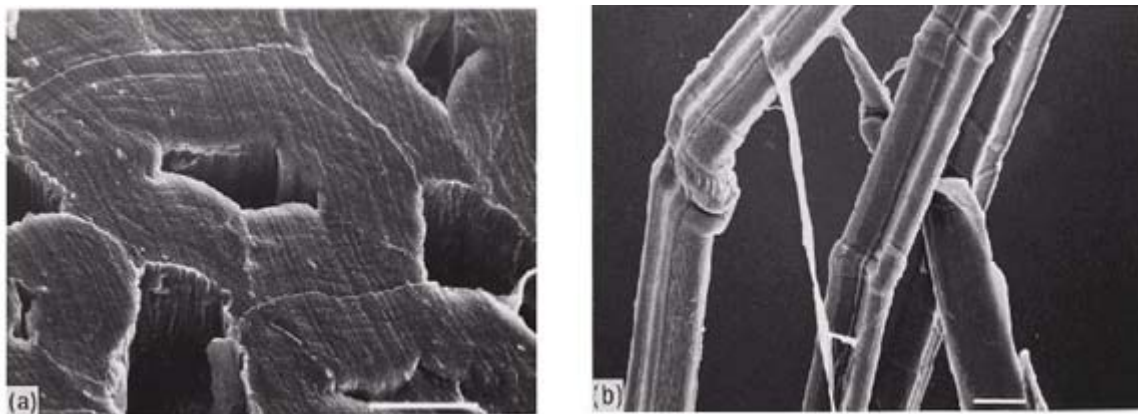
Barva je stříbrnošedá, v horším případě hnědá, nejlépe z běžných přírodních vláken odolává vlivům povětrnosti, vyrábějí se z něj konopná lana. Zpracování je podobné jako u lnu, jelikož si jsou svojí strukturou podobné, ale konopí má o něco lepší mechanické vlastnosti. [23]

Tabulka 1: Porovnání chemického složení konopí a lnu v procentech [23]

Vlákno	Celulóza	Hemi-celulóza	Lignin
len	78,5%	9,2%	8,5%
konopi	68,1%	15,1%	10,6%

Tabulka 2: Struktura elementárních vláken konopí a lnu [23]

Parametr	len	konopí
Průměrná délka, mm	32	20
Příčný rozměr, mm	0.023	0.022
spiralita	S	Z
Úhel sklonu	$5 \cdot 10^0$	$5 \cdot 10^0$



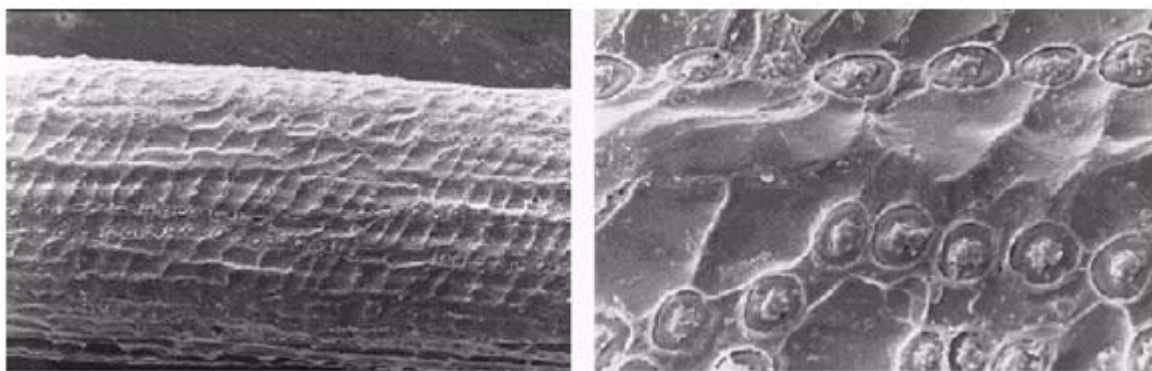
Obr. 8: Příčný řez (vlevo) a podélný pohled (vpravo) na vlákna konopí [23]

2.7.2 Kokos

Získává se z kokosových plodů palem čeledi známé jako *Cocos mucifera*. Základní vlákna mají polygonální tvar příčného řezu, délku 0,3 – 1 mm a příčný rozměr 12 – 14 μm . Pevnosti dosahuje kolem 131 – 175 Mpa a tažnost mezi 15 – 40%, což je nejvíce u celulózových vláken, počáteční modul je 4 – 6 GPa. Povrch vlákna je pokryt póry jak je vidět na pravém snímku níže. [23]

Tabulka 3: Chemické složení kokosu v procentech [23]

Vlákno	Celulóza	Hemi-celulóza	Lignin	Pektin
kokos	32-43%	0,15-0,25%	40-45%	2,5-4%

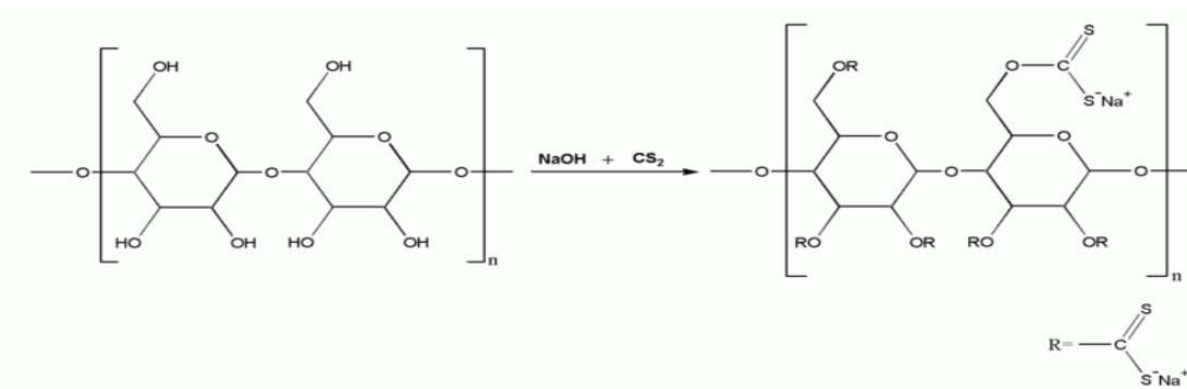


Obr. 9: Vlevo snímek vlákna a vpravo pohled na povrch (levý snímek 5x přiblížen [23])

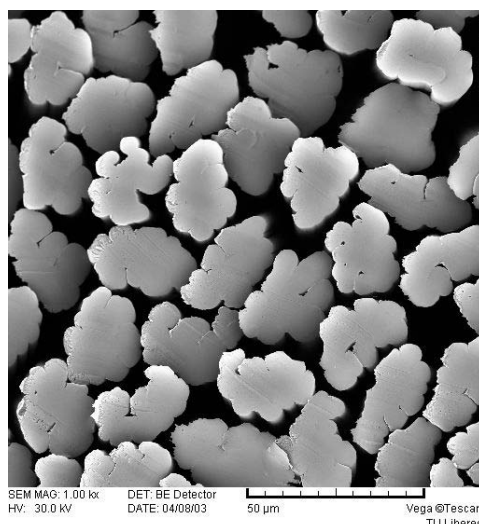
2.7.3 Viskózová vlákna

Začátkem 20. století přišla první viskózová vlákna na trh jako podstatně levnější náhrada za přírodní hedvábí a později za bavlnu a vlnu. V r. 1892 objevili Cross, Bevan a Beadle (Anglie) způsob rozpouštění celulózy přes vytvoření přechodného derivátu (xantogenát). Výroba započala v roce 1904 ve firmě Courtaulds. Viskózová vlákna tvoří 80% chemických vláken z přírodních polymerů. Jsou laciná, ale jejich základní nevýhodou je ekologický neúnosný způsob výroby.

Technologickým procesem je chemická přeměna přírodního polymeru (dřevná celulóza), jeho poslední fází je zvlákňování alkalického viskózového roztoku do kyselé lázně, kde dochází ke vzniku vlákna a k utváření jeho struktury. Vlákenná hmota pak prochází tryskami, jejich velikost následně určuje jemnost hotového viskózového vlákna. Viskóza se velmi často směšuje s vlnou, polyesterem, polyamidem a jinými vlákny. [24]



Obr. 10: Schéma výroby viskózy z celulózy použitím hydroxidu sodného a sulfidu uhličitého [25]

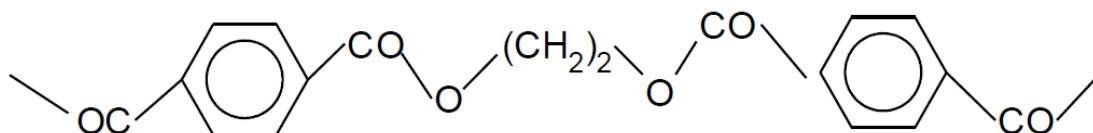


Obr. 11: Řez vláknem viskózy [33]

2.8 Ze zástupců pro anorganická plniva

2.8.1 Polyesterová vlákna

Zaujímají první místo mezi syntetickými vlákny a tvoří 47% celkové produkce. První patenty vznikaly v Anglii a USA v r. 1941 až 1947. Jde o kondenzační produkt s esterovou vazbou v hlavním řetězci. [23]



Obr. 12: Schéma struktury polyesteru [23]

Základní surovinou k výrobě polyesterových vláken je ropa. Vzhledem ke svým univerzálním vlastnostem zaujímají polyesterová vlákna ze všech syntetických polymerů výsadní postavení. Polymer se vytváří polykondenzací tereftalové kyseliny a etylénglykolu a zvlákňuje se přímo z taveniny. Polyesterová vlákna mají různý tvar jako hedvábí, nebo stříže. Vedle standardních vláken se vyrábí i celá řada modifikovaných vláken s pozměněnými vlastnostmi.

K nejdůležitějším kladným vlastnostem patří:

1. Vysoká odolnost na světle, vůči povětrnosti a mikroorganismům (záclony)
2. Malá navlhavost (rychlé sušení)
3. Lehkost
4. Různé možnosti provedení vlákna [26]

2.8.2 Čedičová vlákna

Dalším významným představitelem vláken z přírodních surovin jsou čedičová vlákna. Čedič je vlastně ztuhlá láva z určitých sopek. Jde o obecný název pro skupinu hornin obsahujících řadu kyslíčků. Čedičové horniny mají teplotu tavení přibližně v rozmezí teplot 1500–1700 °C. Při dostatečně prudkém chlazení vzniká sklovitá amorfnní struktura. Při pomalém ochlazení vznikají krystalické struktury, směsi minerálů. Základní minerály jsou plagiocen (teplota krystalizace $T_c=1010^\circ\text{C}$) a pyroxen (teplota krystalizace $T_c=830^\circ\text{C}$), které tvoří kolem 80% čedičů.

Z jednotlivých složek v čediči dominuje kyslíčník křemičitý SiO_2 (v optimálním rozmezí 43,3–47 %), následuje Al_2O_3 (v optimálním rozmezí 11–13 %), CaO (v optimálním rozmezí 10–12 %) a MgO (v optimálním rozmezí 8–11 %). Ostatní kyslíčníky jsou obsaženy v minimálních koncentracích. Čedičové horniny vhodné pro výrobu vláken obsahují nejčastěji dva základní minerály: olivín ($2(\text{MgFe})\cdot\text{O}\cdot\text{SiO}_2$) a nefelin ($\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$).

Podle obsahu SiO_2 lze čediče klasifikovat do tří skupin:

1. alkalické čediče s obsahem SiO_2 do 42%;
2. slabě kyselé čediče s obsahem SiO_2 od 43 do 46%
3. kyselé čediče s obsahem SiO_2 nad 46%.

K výrobě vláken se používají nejvíce kyselé čediče. Čedič je stabilnější v silně alkalickém prostředí, na druhou stranu je stabilita v kyselém prostředí nižší. Čedičové produkty se mohou použít už od velmi nízkých teplot (kolem -200°C) až do poměrně vysokých teplot 700–800 °C. Při vyšších teplotách (nad 300 °C) vznikají krystalické struktury, které jsou důvodem snížení pevnosti. Teplota zesklenní je dle termomechanických křivek $T_g=596^\circ\text{C}$. [23]

Čedičové horniny jsou vhodné pro přípravu vláken, ale musí splňovat tyto požadavky:

1. obsah SiO_2 kolem 46 % a konstantní chemické složení
2. schopnost tání bez pevných zbytků
3. optimální viskozita směsi
4. schopnost tuhnutí bez výrazné krystalizace.

Čedičová vlákna se průmyslově vyrábějí tavným zvlákňováním při 1500–1700 °C. Vlákna jsou dále dloužena při teplotách kolem 1300°C. Měrná hmotnost těchto vláken je 2733 kg.m⁻³. Průměr těchto vláken se pohybuje kolem 9–12 μm. Pevnost čedičových vláken je kolem 1,1-1,5 GPa, smykový modul kolem 21,76 GPa a tažnost kolem 2%. Modul pružnosti v axiálním stlačení bývá 112 GPa. [23]

Čedičová vlákna mají podobné chemické složení jako skelné vlákna, ale mají lepší mechanické vlastnosti. Jsou odolné vůči alkáliím, kyselinám, slaným roztokům. Proto jsou vhodné pro betonové, mostní a pobřežní stavby. V porovnání s uhlíkovým vláknem má vyšší odolnost proti oxidaci, vyšší odolnost proti žáru, vyšší pevnost ve smyku a tlaku. [27]

Další předností čedičových vláken oproti jiným vláknům jsou environmentální a zdravotní výhody. Při výrobě a likvidaci je menší zátěž na životní prostředí a menší riziko při jeho zpracování. Proto se jeví jako dobrý kandidát pro použití v geopolymerních kompozitech. [28]



Obr. 13: Vlevo čedičová vlákna [29], vpravo lom čedičového vlákna [30]

3 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo navrhnout různá vhodná organická a anorganická plniva do geopolymerní směsi a ověřit vlastnosti těchto různých plniv ve spojení s geopolymerní maticí, zda jsou vhodným kandidátem pro jejich použití jako plniva.

Důležité bylo se zaměřit na výsledné mechanické vlastnosti, a zda jsou plniva použitelná. V této práci jsou nejen srovnávána jednotlivá plniva v kombinaci s geopolymerem, ale i pro porovnání s běžně používaným cementem a betonem. Byla sledována tvorba trhlin při tuhnutí, objemové hmotnosti v čerstvém a ztvrdlém stavu, pevnost v tahu za tříbodového ohybu, rázové namáhání a také pevnost v tlaku.

Poslední část diplomové práce se zabývá podrobným zhodnocením dosažených výstupů zkoušek, s čímž souvisí také doporučení plniv vhodných pro další zkoumání. Výstupy bylo třeba hodnotit z více hledisek s uvážením všech provedených zkoušek. Nedílnou součástí práce je pak vyvození závěrů obsahujících doporučení pro navazující výzkum.

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část popisuje blíže metody, suroviny a přístroje, které byly použity pro přípravu a analýzu vzorků.

4.1 Metodika práce

Pro tuto práci bylo vytvořeno několik sad vzorků s různými plnivy z alkalicky aktivovaného geosilikátu komerčně prodáváného Baucis LD 85. Jako hlavní pojivovou složkou bylo dvousložkové geopolymerní pojivo na bázi metakaolinu Baucis LD 85 a draselný aktivátor Baucis LD 85. Od každého druhu plniva byla vytvořena sada 5 vzorků o rozměrech 30x30x150 mm na zkoušku pevnosti v tahu ohybem, 1 vzorek o rozměru 30x30x200 na zkoušku tlakem a 5 vzorků o rozměru 10x10x150 mm pro rázovou zkoušku houževnatosti na Charpyho kladivo. Plniva byla přidána v množství 1,5% a 2,5% z celkového množství, pro srovnání byly dále vytvořeny vzorky cementové s plnivem o obsahu 2,5%, k tomu byl využit běžně prodáváný cement označením pevnostní třídy 42,5R. Ke každému druhu byl vytvořen ještě vzorek bez plniva, pouze z materiálu použité matrice a jedna sada vzorků z cementu a písku běžně známá jako beton.

4.2 Základní materiál

Pro matrici byly zvoleny dva komerčně prodávané produkty.

Baucis LD 85 (složka A a B) - draselný aktivátor a metakaolin světle šedé barvy, od společnosti České lupkové závody a.s.

Vlastnosti: počáteční doba tuhnutí (20 °C) cca 105 min

pevnost v tlaku > 70 MPa za 28 dní, > 80 MPa za 180 dní

pevnost v ohybu > 10 MPa za 28 dní, 12 MPa za 180 dní



Obr. 14: Schéma přípravy z letáku od společnosti České lupkové závody a.s.

Jako druhý komerčně prodáváný produkt pro matici k porovnání byl zvolen Portlantský cement 42,5 R. Normou garantovaná je min. pevnost v tlaku 42,5 MPa po 28 dnech a min. počáteční pevnost 20 MPa již po 2 dnech.

Tabulka 4: Vlastnosti cementu 42,5R dle normy EN 197-1.

Obsah SO ₃	max. 4 %
Obsah Cl-	max. 0,1 %
Objemová stálost	max. 10 mm
Počáteční tuhnutí	min. 60 minut
Pevnost v tlaku 2 dny	min. 20,0 MPa
Pevnost v tlaku 28 dní	min. 42,5 MPa,
	max. 62,5 MPa

Pro srovnávací vzorek byla zvolena směs známá obecně jako Beton. Připraven byl ze směsi cementu 42,5R a křemenného písku dodaného firmou České lupkové závody a.s. o zrnitost 0,315 – 0,8 (Obr.15) v poměru dle receptury níže.



Obr. 15: Křemenný písek

4.3 Receptury

Pro přípravu matrice byly spočítány a vždy naváženy v množství daném poměrem od výrobce, a to v poměru u Baucisu pojivo a aktivátor 0,9:1 a u cementu obsah vody 0,3 až 0,55 dílu na 1 díl cementu. Beton byl pak namíchán dle běžného poměru cementu a písku 1:2.

Tabulka 5: Hmotnostní díly jednotlivých složek

Baucis LD85		Cement 42,5		Beton 1:2		
Složka A	Složka B	Cement	Voda	Cement	Voda	Písek
896g	995g	1400g	560g	466g	560g	933g

4.4 Použité plnivo

Plnivo a ostatní složky byly váženy v suchém stavu na digitální váze (Obr.16), dále pak míchány dle receptury.



Obr. 16: Vážení konopného vlákna

Tabulka 6: Hmotnostní díly plniv

Plnivo	Baucis LD85			Cement 42,5
	1,5%	2,5%	3,0%	2,5%
	28,35g	47,25g	56,7g	49g

Tabulka 7: Přehled použitých plniv

Plniva	Vlákno	Drť
Dřevo (smrk)	-	x
Kokos	x	x
Konopí	x	-
Viskóza	x	-
Čedič	x	-
Polyester	x	-

Dřevo

Pro toto plnivo byly zvoleny piliny ze smrkového dřeva, jedná se o odpad vzniklý při zpracování dřeva. Piliny převážně velikosti viz Obr.17. Od výrobce LIMARA Plus s.r.o. Kunštát.



Obr. 17: Dřevěné plnivo (smrk)

Kokos

U tohoto plniva bylo v práci použito vláken a drť od firmy Robimaus. Vláknna byla nastříhána na délku do 1,5 cm (Obr.18) a drť s obchodním názvem Lignocel (Obr.19).



Obr. 18: Kokosové vlákno



Obr. 19: Kokosová drť

Konopí

Zde bylo použito běžně dostupného instalatérského těsnícího vlákenného konopí od firmy Haas, prodávaného v copu. Zde bylo zase pro přípravu vzorku nutno vlákna nastříhat na délku do 1,5 cm (Obr.20).



Obr. 20: Konopné vlákno

Viskóza

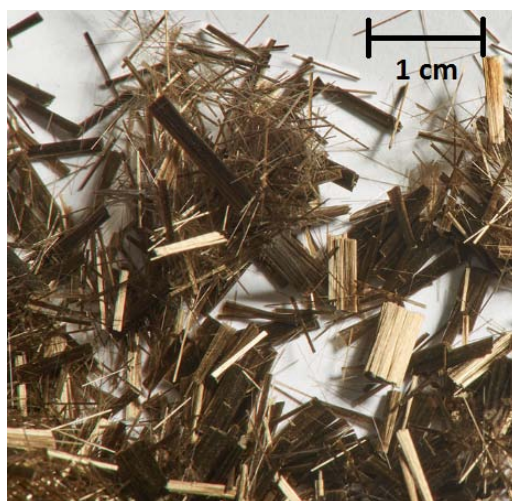
Viskóza byla získána nastříháním z příze o průměru 1 mm na délku 1 cm, toto vlákno bylo složeno z mnoha tenčích vláken, které se pak při míchání od sebe oddělily. Tato oddělená vlákna mají miniaturní rozměry o průměru 25 μm (Obr.21).



Obr. 21: Viskózové vlákno

Čedič

Pro vzorky s čedičovým plnivem bylo použito průmyslově zpracovaných vláken, nadělených na délku do 1 cm již z výroby (Obr.22).



Obr. 22: Čedičová stříž

Polyester

Zde byla opět použita rozstříhaná polyesterová příze o průměru 1 mm na délku 1 cm. Tato vlákna (Obr.23) byla složena z menších vláken o průměru 25 μm , která se při míchání oddělovala z příze.



Obr. 23: Čedičové vlákno

4.5 Příprava zkušebních vzorků

4.5.1 Míchání směsi

Všechny směsi byly míchány v nerezové nádobě pomocí elektrického míchadla. Nejdříve se zamíchalo geopolymerní pojivo Baucis s aktivátorem Baucis po dobu cca 2 minut. Nakonec se přidala plniva (vlákna, drť). Tato směs byla dále důkladně promíchána cca 5 - 6 minut, aby byla vlákna rozprostřena a zamíchána v celé směsi (Obr.24).



Obr. 24: Rozmíchaná směs Baucisu a vlákněho plniva (konopí)

4.5.2 Zkušební tělesa

Byly vyrobeny formy z voděodolné překližky pro výrobu trámečků 30x30x150 mm a 30x30x200 mm (Obr.25) pro pozdější nařezání na krychle 30 x 30 x 30 mm a forma ze silikonu pro malé trámečky 10 x 10 x 150 mm (Obr.26). Při plnění forem bylo použito vibračního přístroje, abychom zamezili tvorbě vzduchových bublin, pouze u plniv z drtě vibrování nebylo použito, jelikož drť by byla vyplavována na povrch. Zkušební tělesa poté tvrdla pod folií při laboratorní teplotě 20°C po dobu 24 hodin a následně byla odformována. Zkušební tělesa byla po odformování uložena ve dvou typech uložení – první část těles z Baucisu byla zabalena do průhledné fólie a uložena v laboratoři, druhá část těles z cementu byla uložena do vody. Všechna tělesa byla po dobu 28 dní kontrolována na vznik trhlin.



Obr. 25: Forma pro trámečky 30x30x200 mm



Obr. 26: Forma pro malé trámečky 10x10x150 mm ze silikonu

4.6 Popis prováděných zkoušek

4.6.1 Tvorba trhlin

Zkouška byla prováděna pouze vizuálně na zkušebních tělesech po dobu zrání vzorků v období po 28 dní.

Žádný ze vzorků nejevil tendenci k tvorbě trhlin. U několika vzorků 10x10x150 mm bez vláknového plniva a vzorků s použitou drtí (kokos a smrkové dřevo) docházelo k nepatrnému průhybu vlivem tuhnutí. Tyto vzorky byly vyřazeny z dalšího zkoušení.

4.6.2 Objemová hmotnost v čerstvém stavu

Podstatou této zkoušky je zjistit objemovou hmotnost směsi v čerstvém stavu. Nejprve si stanovíme objem vhodné nádoby, kterou budeme pro tuto zkoušku používat. Následně si nádobu zvážíme prázdnou. Nádobu naplníme vytvořenou směsí. Plnou nádobu se směsí opět zvážíme. Z těchto zjištěných hodnot jednoduše spočítáme objemovou hmotnost v čerstvém stavu podle vztahu:

$$D_{\text{č}} = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (1)$$

V...objem nádoby [m^3]

m_1 ...hmotnost prázdné nádoby [kg]

m_2 ...hmotnost plné nádoby [kg]

$D_{\text{č}}$...objemová hmotnost v čerstvém stavu

4.6.3 Objemová hmotnost v tuhém stavu

Podstatou pro tuto zkoušku je zjistit objemovou hmotnost v zatvrdlém stavu. Nejprve si zkušební vzorek zvážíme. Následně si vzorek změříme, abychom zjistili jeho objem. Z těchto naměřených hodnot se následně spočítá objemová hmotnost v zatvrdlém stavu podle vztahu:

$$D_z = \frac{m}{V} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2)$$

V...objem tělesa [m^3]

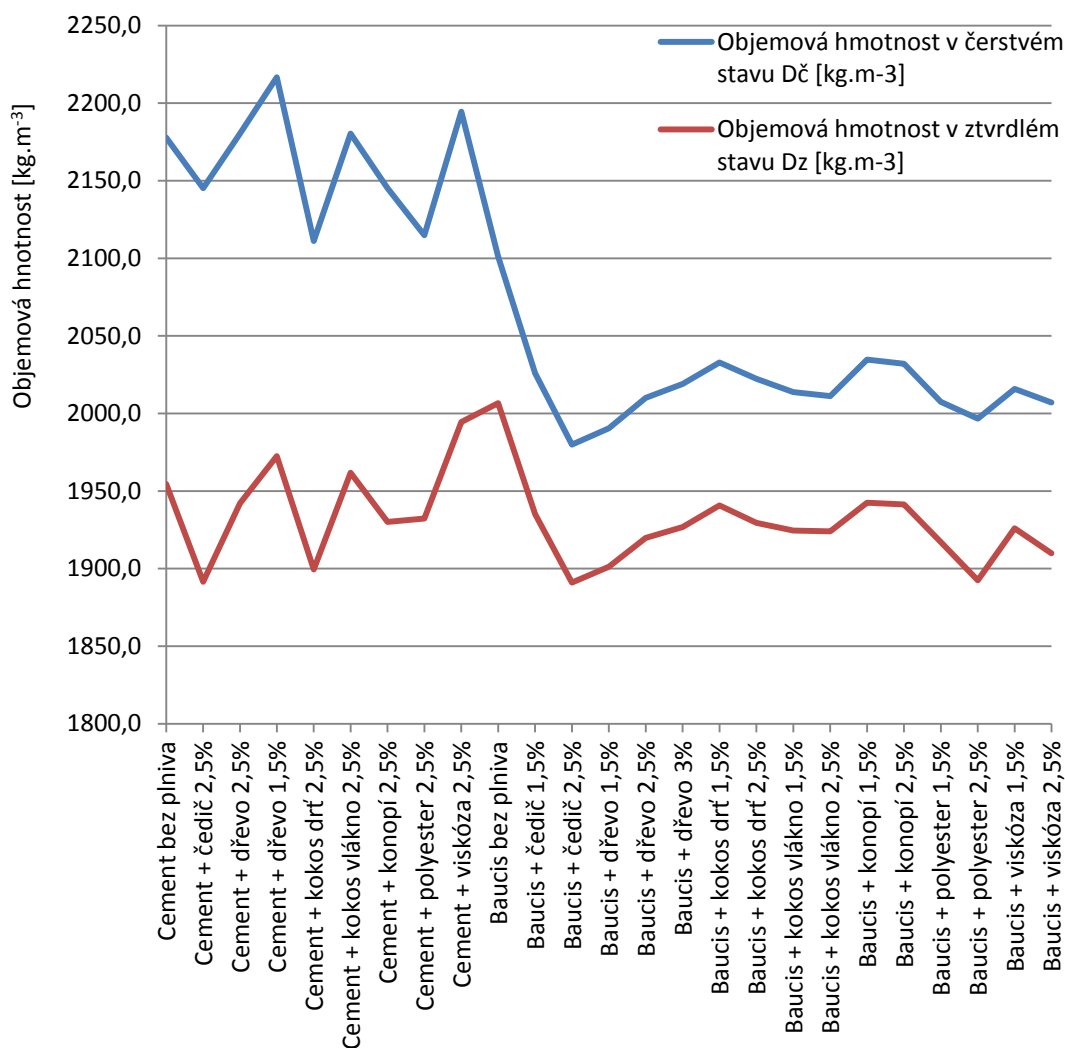
m ...hmotnost zkušební vzorku [kg]

D_z ...objemová hmotnost v zatuhlém stavu

4.6.4 Výsledky objemové roztažnosti a diskuze

Tabulka 8: Výsledky objemové roztažnosti

Druh směsi	Objemová hmotnost v čerstvém stavu Dč [kg.m ⁻³]	Objemová hmotnost v ztvrdlém stavu Dz [kg.m ⁻³]
Cement bez plniva	2177,8	1954,6
Cement + čedič 2,5%	2145,2	1891,5
Cement + dřevo 2,5%	2180,3	1942,1
Cement + dřevo 1,5%	2216,7	1972,5
Cement + kokos drť 2,5%	2111,1	1899,5
Cement + kokos vlákno 2,5%	2180,3	1961,7
Cement + konopí 2,5%	2145,2	1930,1
Cement + písek 2,5%	2105,8	1988,5
Cement + polyester 2,5%	2114,9	1932,3
Cement + viskóza 2,5%	2194,5	1994,4
Baucis bez plniva	2101,1	2006,7
Baucis + čedič 1,5%	2026,0	1935,2
Baucis + čedič 2,5%	1979,9	1891,1
Baucis + dřevo 1,5%	1990,4	1901,3
Baucis + dřevo 2,5%	2010,0	1919,8
Baucis + dřevo 3%	2019,1	1926,8
Baucis + kokos drť 1,5%	2032,9	1940,7
Baucis + kokos drť 2,5%	2022,3	1929,5
Baucis + kokos vlákno 1,5%	2013,7	1924,6
Baucis + kokos vlákno 2,5%	2011,2	1924,0
Baucis + konopí 1,5%	2034,7	1942,5
Baucis + konopí 2,5%	2032,0	1941,4
Baucis + polyester 1,5%	2007,5	1917,1
Baucis + polyester 2,5%	1996,6	1892,5
Baucis + viskóza 1,5%	2015,8	1925,9
Baucis + viskóza 2,5%	2007,0	1909,9



Graf 1: Znáznornění výsledků objemové roztlačnosti

Diskuse k výsledkům

Namíchaná směs byla nejdříve zvážena po namíchání, ještě před umístěním do forem a následně po ztuhnutí. Vzorky byly měřeny po vyschnutí a ztuhnutí dle návodu od výrobce to bylo po 28 dnech.

Nejmenší míra smrštění byla naměřena u cementu na vzorku s plnivem 2,5 % polyesteru a u geopolymerního vzorku z baucisu a 2,5 % kokosového vlákna.

Největší míra smrštění byla naměřena u vzorku z cementu a 2,5% čedičového vlákna a u geopolymerního vzorku z baucisu a 2,5 % viskóзовého vlákna.

Míra smrštění u geopolymerní matrice byla u všech vzorků přibližně stejná a měnila se pouze v rozmezí několika jednotek kg.m⁻³.

4.6.5 Pevnost v tahu ohybem

Tato pevnost byla stanovena podle normy ČSN EN 12390-5 (Obr.27) – Zkoušení ztvrdlého betonu Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles. Zkouška probíhá na zkušebních tělesech o velikosti 30 x 30 x 150 mm. Zkušební těleso se uloží do zkušebního přístroje kolmo na směr hutnění na dvě dolní válcové podpory, které byly vzdálené od sebe 90 mm. Horní váleček pak působí uprostřed podpor na zkušební těleso (Obr.28). Zatěžuje se stálou rychlostí, až dojde k porušení (Obr.30). Síla při průběhu porušení zkušebního tělesa se zaznamená v programu na PC. Následně se vypočte pevnost v tahu za ohybu ze vztahu:

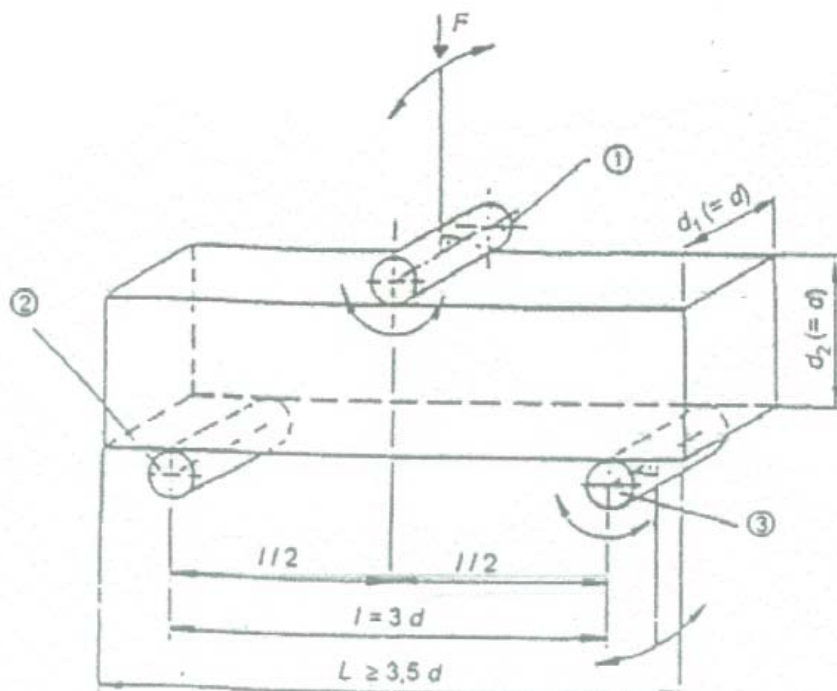
$$f_{cf} = \frac{3.F.l}{2.d_1.d_2^2} \quad [\text{MPa}] \quad (3)$$

f_{cf} ...je pevnost v tahu ohybem [MPa]

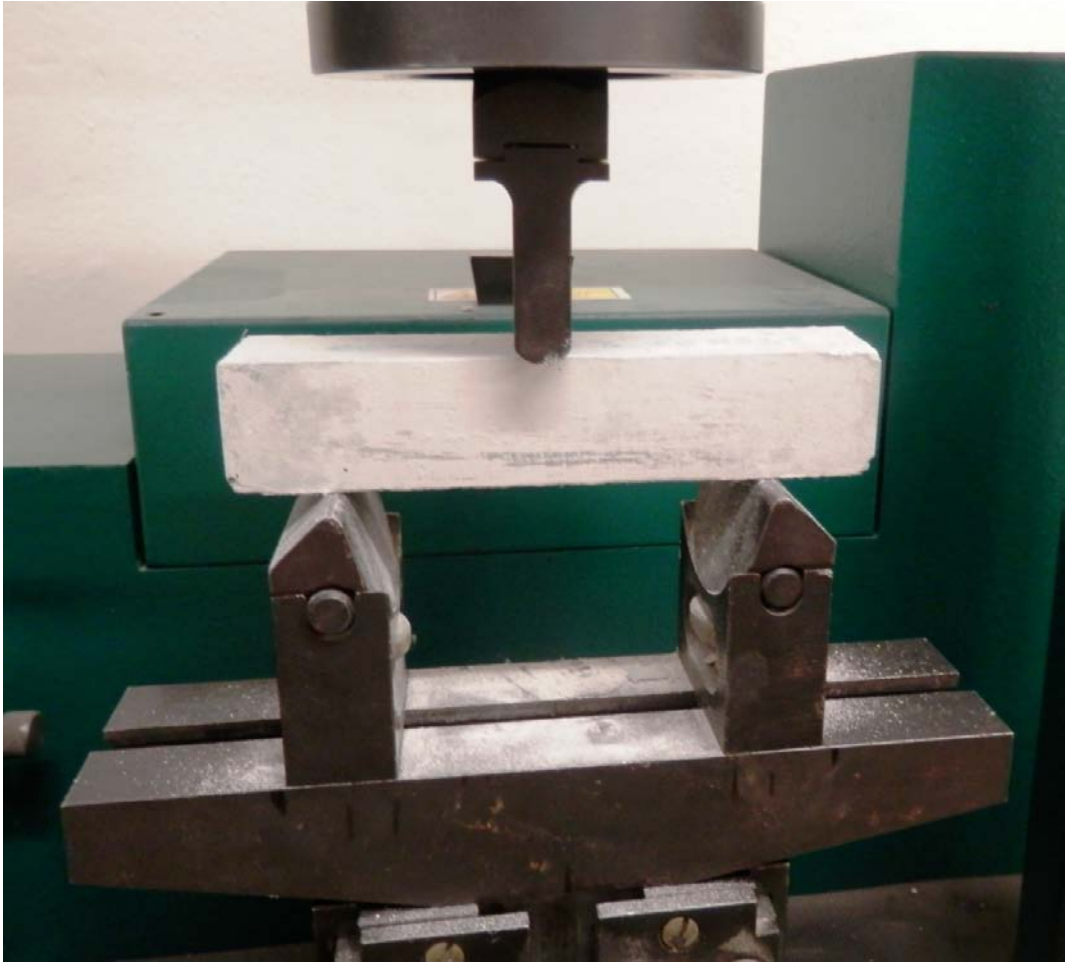
F ... maximální zatížení [N]

l ... Vzdálenost mezi podpěrnými válečky [mm]

d_1 a d_2 ...jsou rozměry příčného řezu [mm]



Obr. 27: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa dle normy ČSN EN 12390-5



Obr. 28: Uspořádání zatěžování při zkoušce pevnosti v tahu ohybem.

Ke zjištění mechanických vlastností materiálů při zkoušce pevnosti v tahu ohybem bylo použito zkušební zařízení INSTRON – LabTest II (Obr.29). Vyhodnocení testu zajišťoval program LabTest v.3.

Na zařízení byly vyhodnocovány tyto mechanické vlastnosti:

- Maximální síla při porušení vzorku F_{max} [N]
- Tažnost při maximálním zatížení A [mm]
- Modul pružnosti v tahu E [MPa]

Parametry zkoušení:

- Šířka podpor l : 90 mm
- Rychlost posuvu: 2 mm/min
- Konec zkoušky při poklesu zatěžující síly o 50%



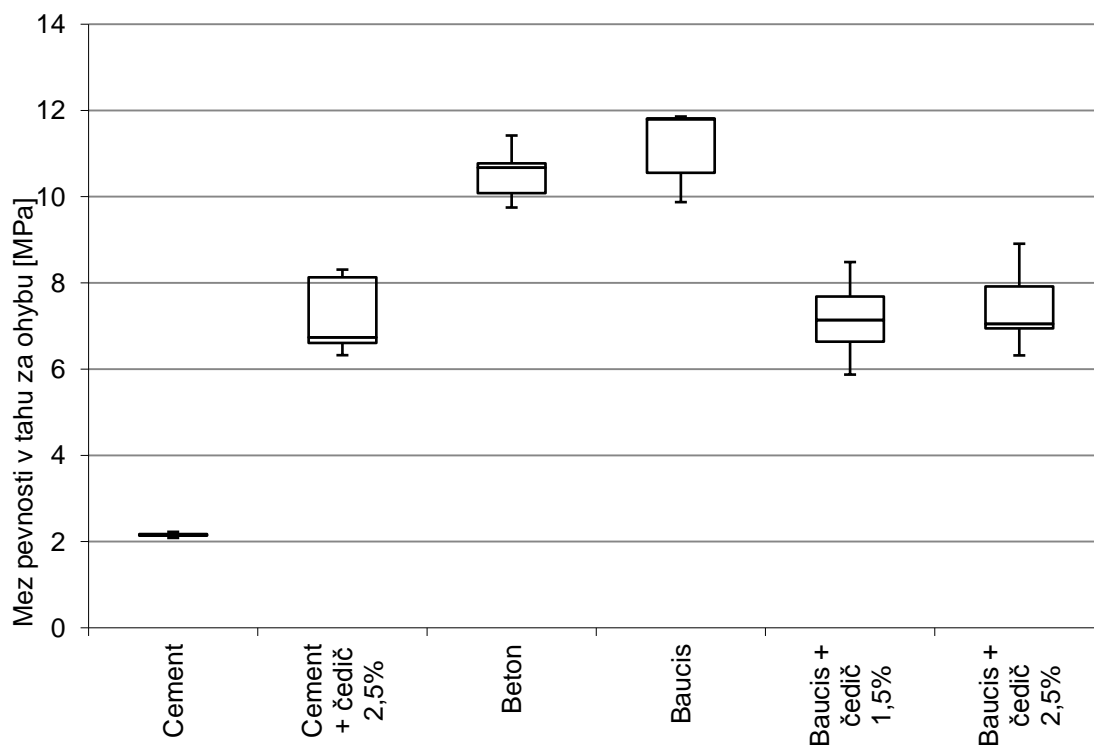
Obr. 29: Měřicí přístroj INSTRON – LabTest II



Obr. 30: Fotka z průběhu testu - Porušení vzorku s cementovou matricí a plnivem z kokosových vláken.

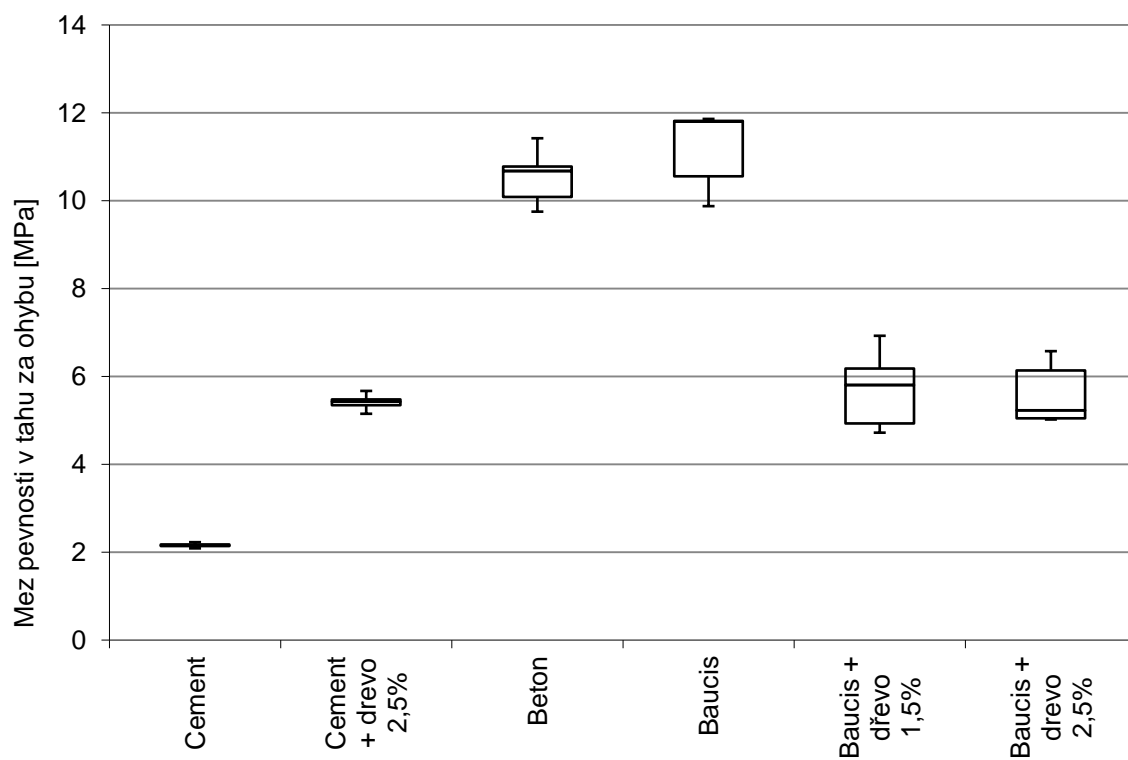
4.6.6 Výsledky pevnosti v tahu ohybem

Čedičové vlákno



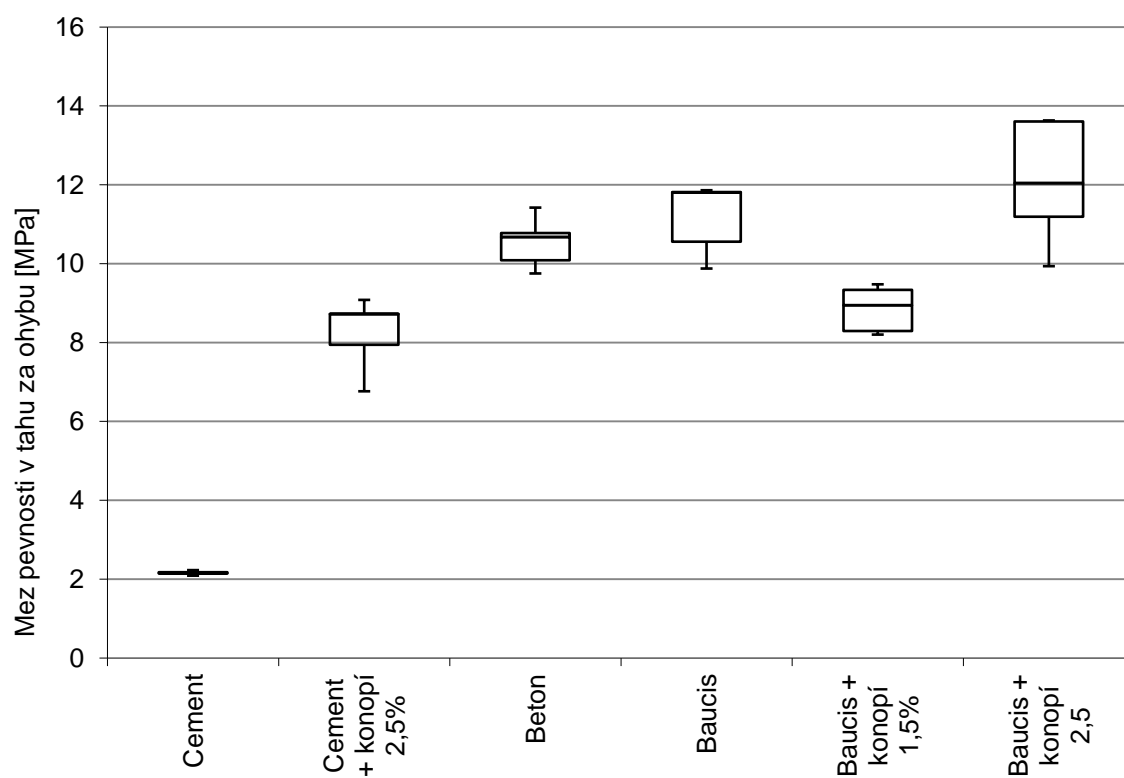
Graf 2: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Čedičové vlákno

Dřevo (Smrkové)



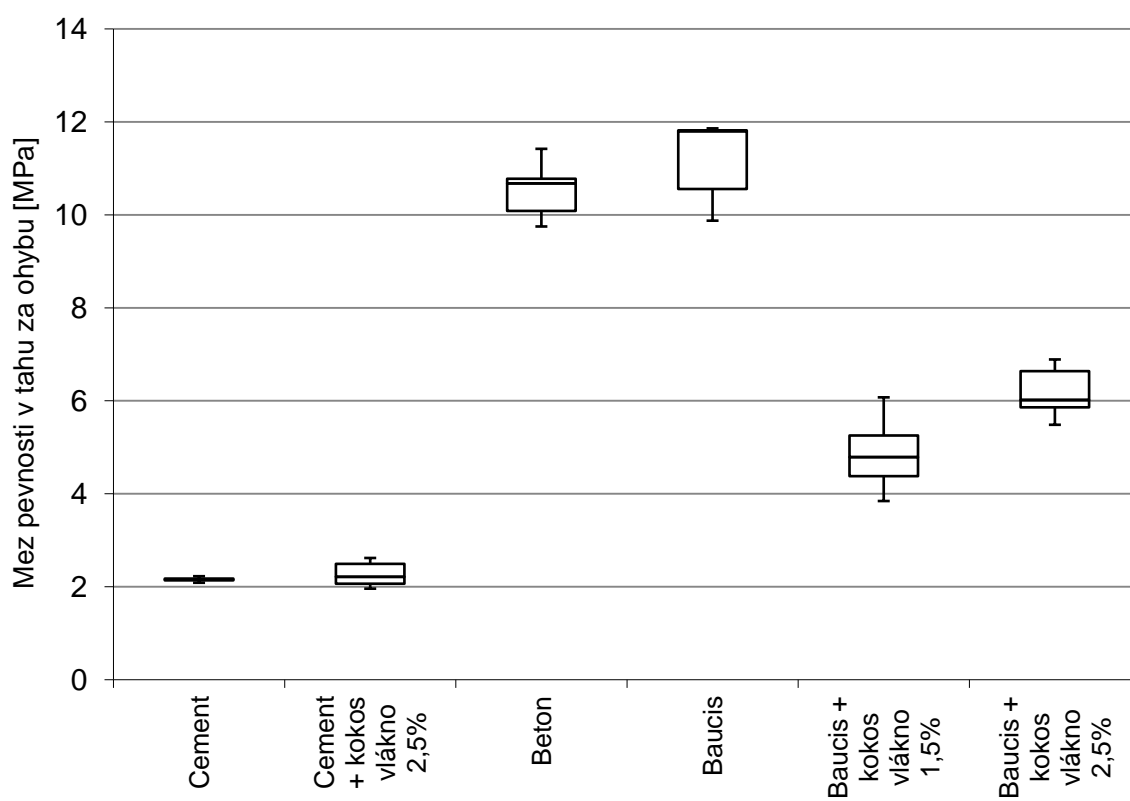
Graf 3: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Dřevo

Konopné vlákno



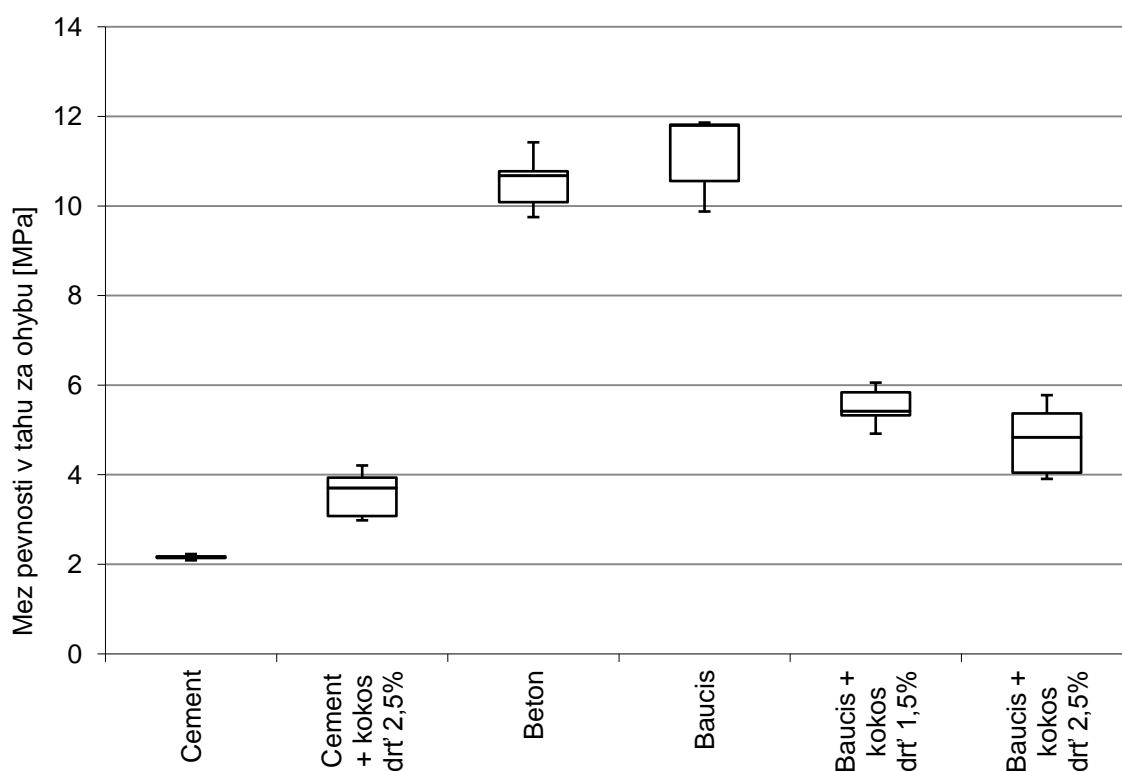
Graf 4: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Konopí

Kokosové vlákno



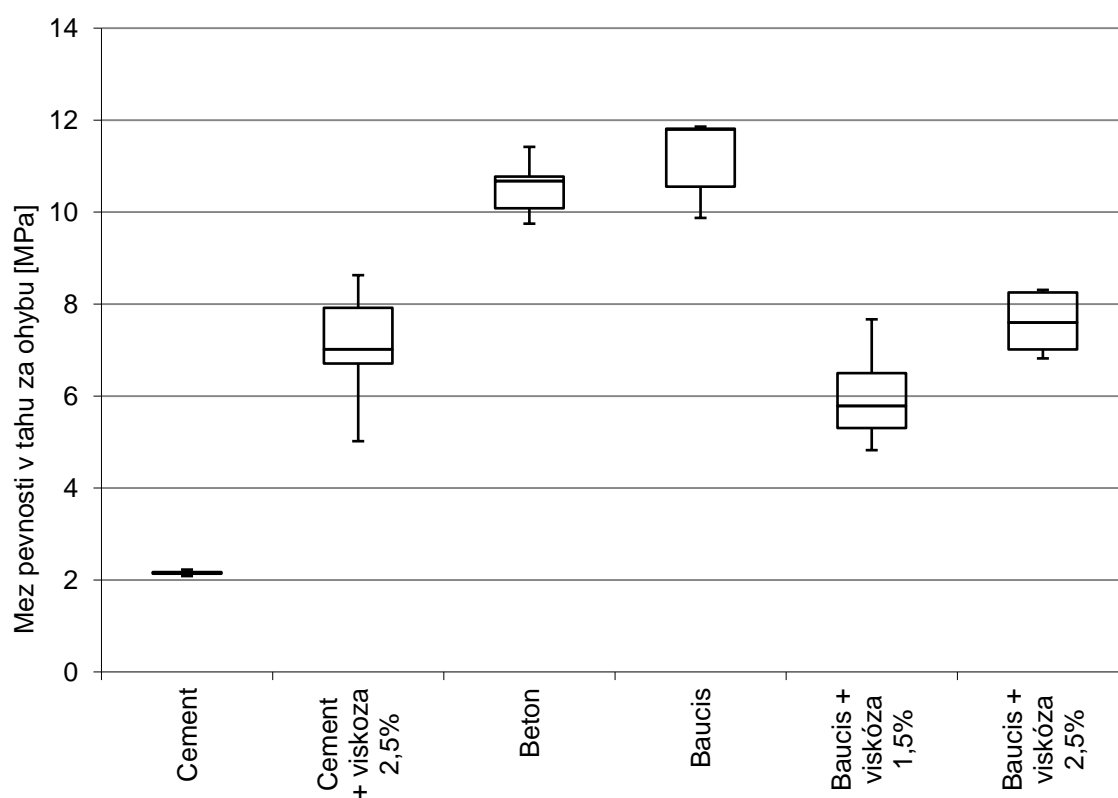
Graf 5: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Kokosové vlákno

Kokosová drť



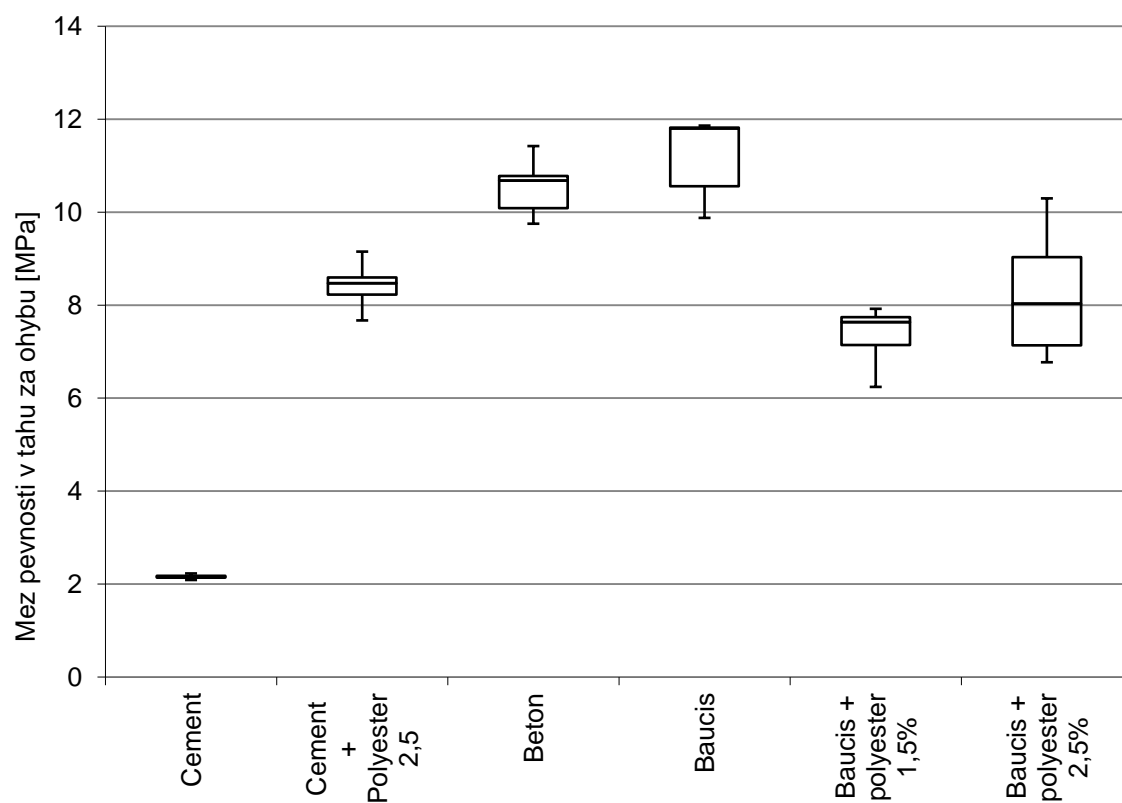
Graf 6: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Kokosová drť

Viskózní vlákno



Graf 7: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Viskózní vlákno

Polyesterové vlákno



Graf 8: Srovnání výsledků pevnosti v tahu - Polyesterové vlákno

4.6.7 Výsledky - Mez pružnosti v tahu a Tažnosti

Tabulka 9: Průměrná mez pružnosti v tahu

Vzorek	Průměrná hodnota Modul pružnosti v tahu E [MPa]	Směrodatná odchylka s	Variační koeficient V [%]
Beton	51,2	4,57	8,9
Baucis + konopí 1,5%	38,7	4,45	11,5
Baucis bez plniva	38,3	2,23	5,8
Baucis + konopí 2,5%	35,9	5,10	14,2
Baucis + polyester 1,5%	30,2	2,65	8,8
Baucis + dřevo 1,5%	29,4	5,32	18,1
Baucis + viskóza 1,5%	28,9	3,71	12,8
Cement + konopí 2,5%	28,8	1,58	5,5
Baucis + čedič 1,5%	27,2	3,62	13,3
Cement + viskóza 2,5%	26,8	1,74	6,5
Baucis + kokos vlákno 2,5%	26,1	5,36	20,5
Baucis + dřevo 3%	25,9	6,69	25,8
Baucis + kokos drť 1,5%	25,9	6,69	25,8
Baucis + kokos vlákno 1,5%	25,9	10,35	40,0
Baucis + dřevo 2,5%	25,3	1,71	6,7
Cement + čedič 2,5%	23,9	3,11	13,0
Baucis + čedič 2,5%	23,7	3,89	16,4
Baucis + kokos drť 2,5%	22,6	2,22	9,9
Cement + dřevo 2,5%	20,6	1,34	6,5
Baucis + viskóza 2,5%	20,6	3,67	17,8
Cement + polyester 2,5%	18,7	1,94	10,4
Baucis + polyester 2,5%	17,8	1,79	10,1
Cement + kokos drť 2,5%	15,6	1,53	9,8
Cement + dřevo 1,5%	13,9	1,90	13,6
Cement bez plniva	10,2	1,72	16,9
Cement + kokos vlákno 2,5%	7,5	1,61	21,4

Tabulka 10: Průměrná tažnost

Vzorek	Průměrná hodnota Tažnost A [mm]	Směrodatná odchylka s	Variační koeficient V [%]
Beton	2,48	0,30	12,3
Baucis + konopí 1,5%	3,06	0,33	10,9
Baucis bez plniva	1,82	0,17	9,3
Baucis + konopí 2,5%	1,74	0,21	12,0
Baucis + polyester 1,5%	3,20	0,40	12,6
Baucis + dřevo 1,5%	2,73	0,35	12,7
Baucis + viskóza 1,5%	2,84	0,52	18,3
Cement + konopí 2,5%	2,23	0,31	13,9
Baucis + čedič 1,5%	3,12	0,28	8,9
Cement + viskóza 2,5%	2,61	0,24	9,2
Baucis + kokos vlákno 2,5%	2,32	0,40	17,2
Baucis + dřevo 3%	2,46	0,36	14,5
Baucis + kokos drť 1,5%	2,46	0,36	14,5
Baucis + kokos vlákno 1,5%	2,77	0,44	16,0
Baucis + dřevo 2,5%	1,18	0,36	30,8
Cement + čedič 2,5%	2,69	0,55	20,4
Baucis + čedič 2,5%	3,04	0,46	15,2
Baucis + kokos drť 2,5%	1,11	0,24	21,3
Cement + dřevo 2,5%	1,97	0,18	9,2
Baucis + viskóza 2,5%	3,84	0,53	13,8
Cement + polyester 2,5%	3,98	0,98	24,6
Baucis + polyester 2,5%	2,93	1,05	35,7
Cement + kokos drť 2,5%	1,81	0,21	11,4
Cement + dřevo 1,5%	1,34	0,33	24,6
Cement bez plniva	2,25	0,59	26,3
Cement + kokos vlákno 2,5%	1,38	0,20	14,2

4.6.8 Pevnost v tlaku

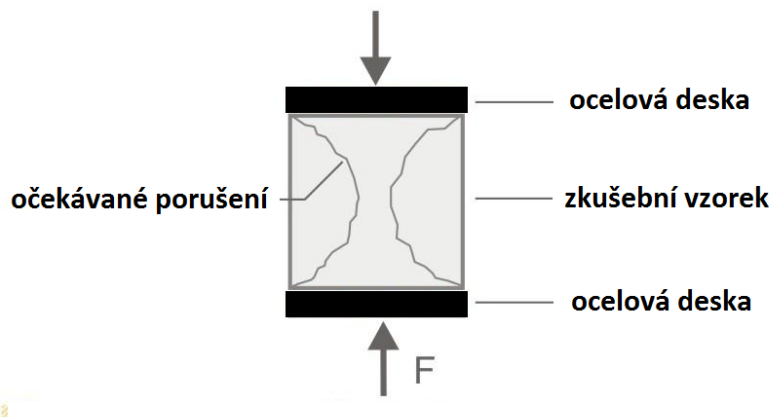
Tato pevnost byla stanovena podle normy ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Zkouška probíhá na zkušebních tělesech o rozměru 30x40x30 mm. Zkušební těleso se vkládalo do zkušebního lisu kolmo na směr hutnění. Tlačná plocha je 1200 mm². Zatěžování probíhá plynulou rychlostí a zvyšuje se až do celkového porušení (Obr.31 a 32). Síla zatížení při porušení se zaznamená na PC a vypočte se pevnost v tlaku podle vztahu:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \text{ [Mpa]} \quad (4)$$

F... maximální síla při porušení [N]

A_c... průřezová plocha zkušebního tělesa 1200 mm²

f_c ...pevnost v tlaku



Obr. 31: Uspořádání zatěžování zkušebního tělesa dle normy ČSN EN 12390-3



Obr. 32: Uspořádání zatěžování při zkoušce pevnosti v tlaku - Beton

Ke zjištění mechanických vlastností materiálů při zkoušce pevnosti v tlaku bylo použito zkušební zařízení P 100 – LabTest II (Obr.33). Vyhodnocení testu zajišťoval program LabTest v.3.

Na zařízení byly vyhodnocovány tyto mechanické vlastnosti:

- Maximální síla při porušení vzorku F_{\max} [N]

Parametry zkoušení:

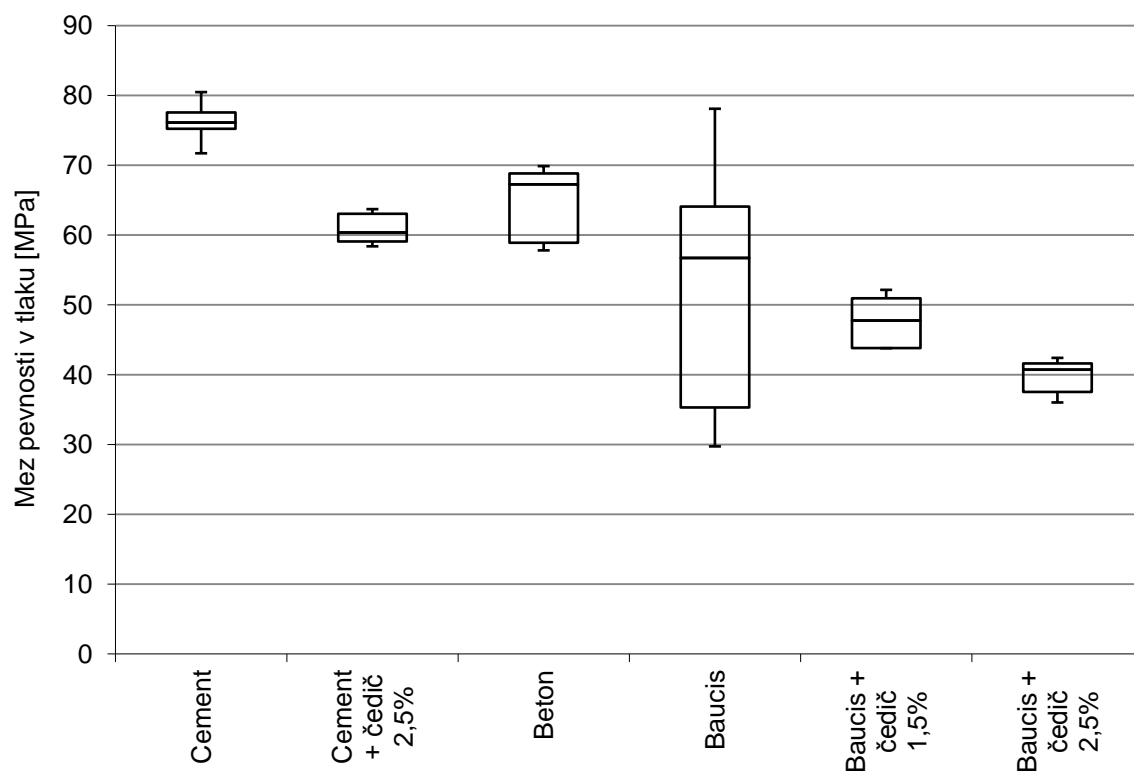
- Velikost zatěžované plochy: 30x40 mm
- Rychlost posuvu: 2 mm/min
- Konec zkoušky při poklesu zatěžující síly o 25%



Obr. 33: Zkušební přístroj P100 – LabTest II

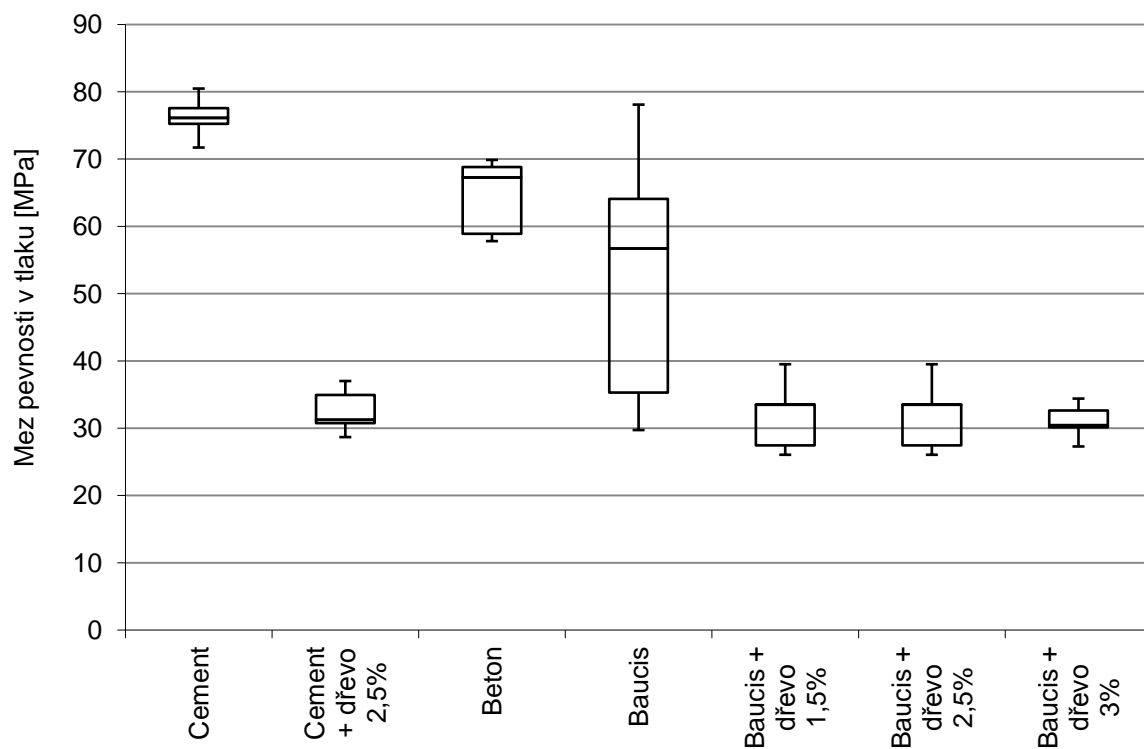
4.6.9 Výsledky pevnosti v tlaku

Čedičové vlákno



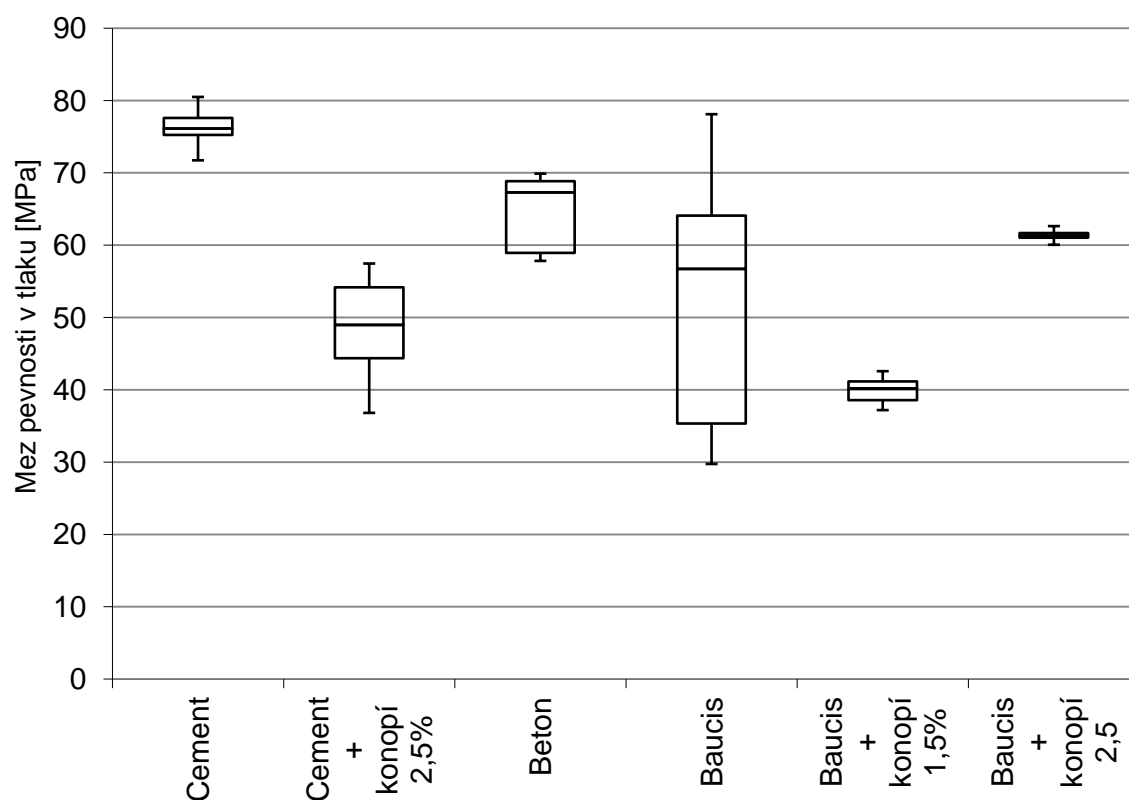
Graf 9: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Čedičové vlákno

Dřevo (Smrkové) drt'



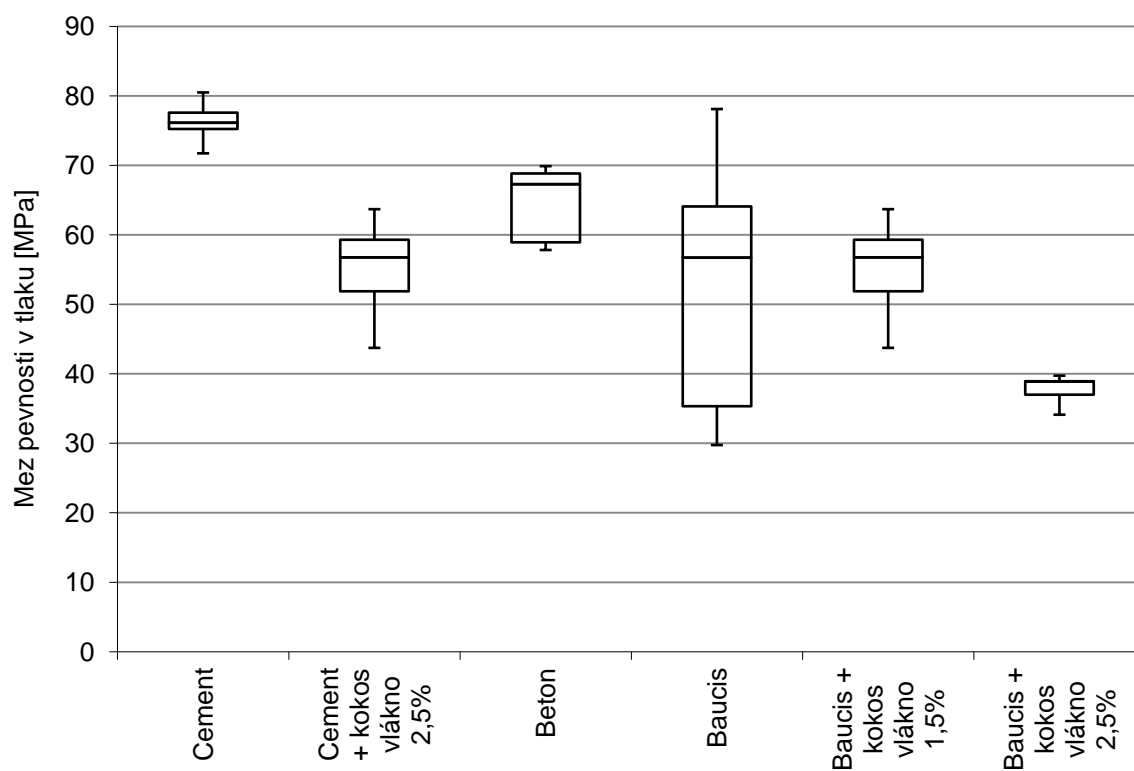
Graf 10: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Dřevo

Konopné vlákno



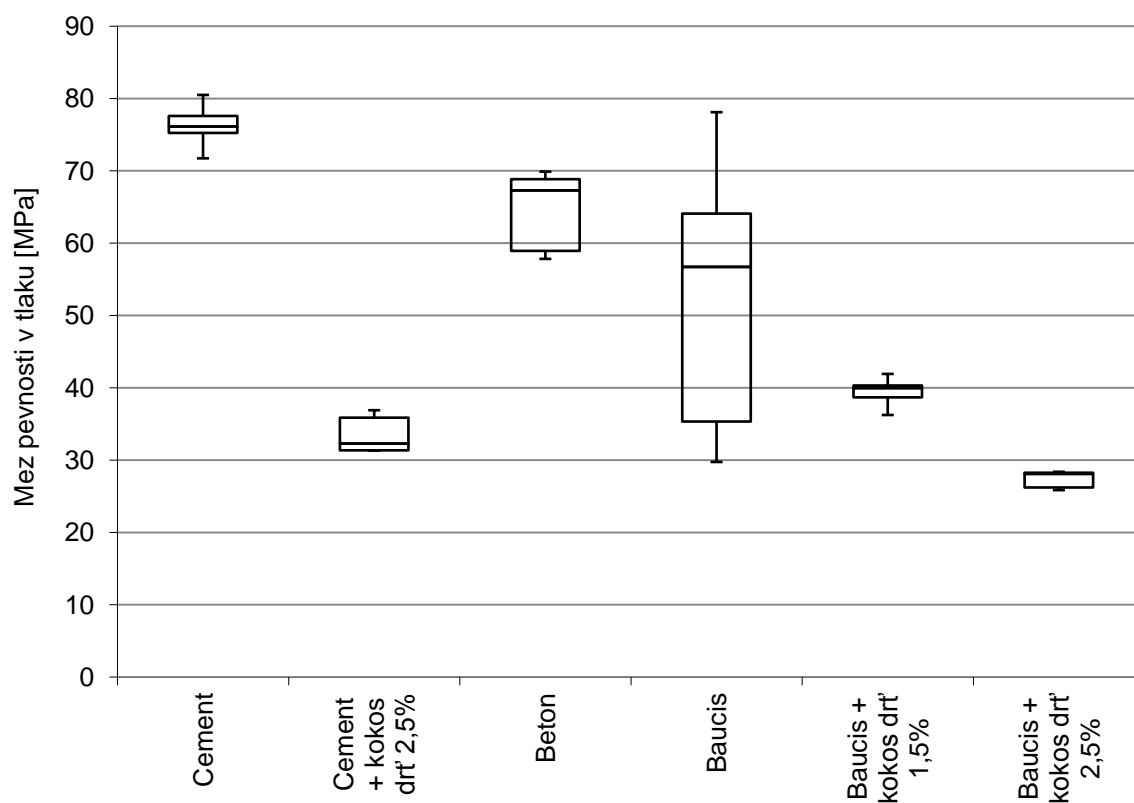
Graf 11: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Konopné vlákno

Kokosové vlákno



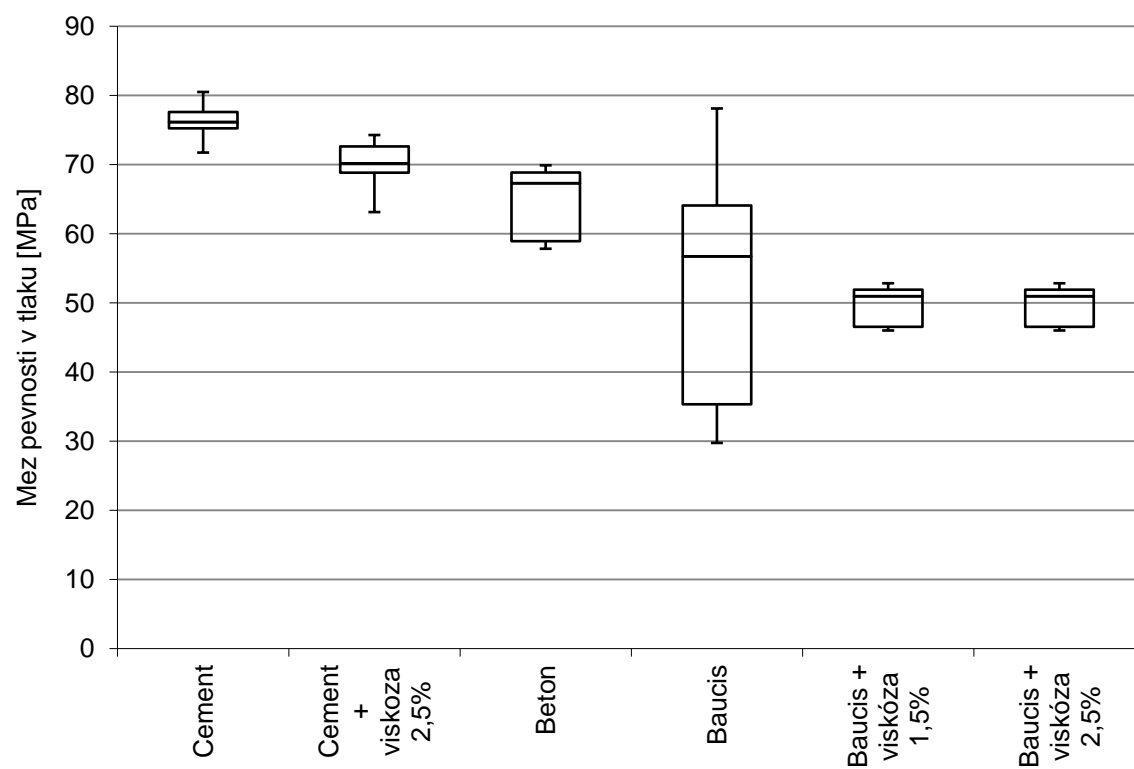
Graf 12: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Kokosové vlákno

Kokosová drť



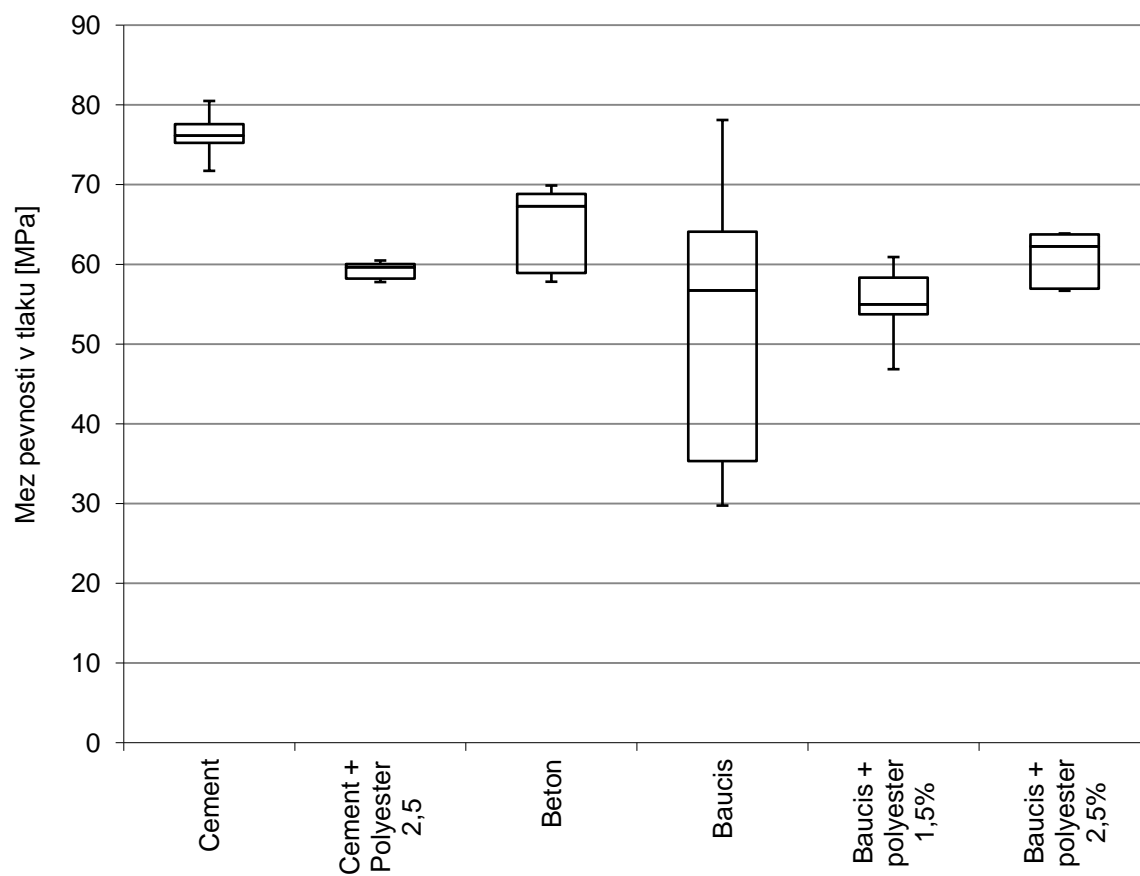
Graf 13: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Kokosová drť

Viskózní vlákno



Graf 14: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Viskózní vlákno

Polyesterové vlákno



Graf 15: Srovnání výsledků pevnosti v tlaku - Polyesterové vlákno

4.6.10 Zkouška rázem

Zkouškou se zjišťuje odolnost materiálu proti křehkému porušení při dynamickém, rázovém namáhání. Křehké porušení je nestabilní oddělení částic materiálu. Vznik lomové plochy při nominálním napětí nižším, než je mez kluzu materiálu. Mez kluzu je zjistitelná statickou zkouškou v tahu. Křehký lom vzniká náhle, šíří se vysokou rychlostí. Lomová plocha je kolmá na největší normálové tahové napětí. Potřebná energie na porušení vzorku je minimální. [31,32]

Zkouška se provádí na kyvadlovém kladivu zvaném Charpyho kladivo. Zkoušená tyč je jednostranně uložená mezi dvěma podpěrami a přeražena nárazem kyvadlového kladiva (Obr.34). Práce spotřebovaná na přeražení zkušební tyče E je dána rozdílem potenciálních energií:

$$E = F_G (H - h) \quad [\text{J}] \quad (5)$$

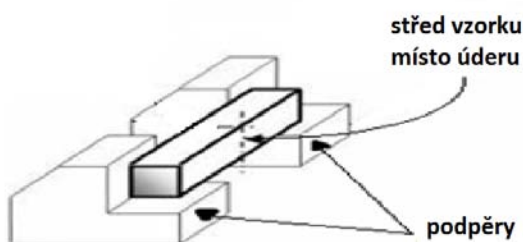
F_G ... tíha závaží kladiva [$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

H ... počáteční výška beranu [mm]

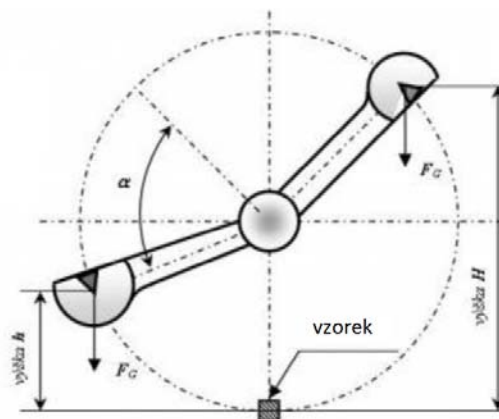
h ... výška, do které se vyhoupne beran po přeražení vzorku [mm]

E ... energie [J]

Nárazové energii je přímo úměrný úhel α . Součástí Charpyho kladiva je úhloměr, který umožňuje odčítat velikost nárazové práce (Obr.35). [31,32]

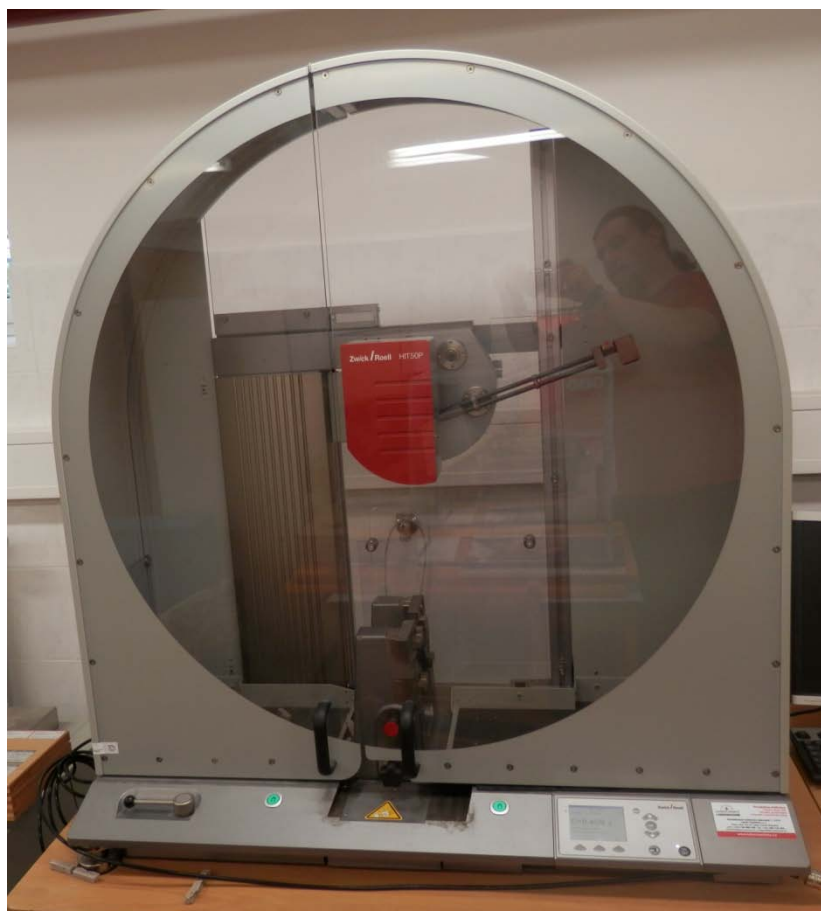


Obr. 34: Uložení vzorku při zkoušce rázem [32]



Obr. 35: Funkce Charpyho kladiva [32]

Ke zjištění mechanických vlastností materiálů při zkoušce rázem bylo použito zkušební zařízení Zwick / Roell HIT50P (Obr.36 a 37). Vyhodnocení naměřených hodnot zajišťoval přímo přístroj. Pro zkoušku byly zvoleny dvě kyvadlová kladiva, vždy tak aby naměřené hodnoty byly ve vhodném rozsahu dobře měřitelné.



Obr. 36: Měřicí přístroj Zwick / Roell HIT50P



Obr. 37: Uložení vzorku v přístroji Zwick / Roell HIT50P

Na zařízení byly vyhodnocovány tyto mechanické vlastnosti:

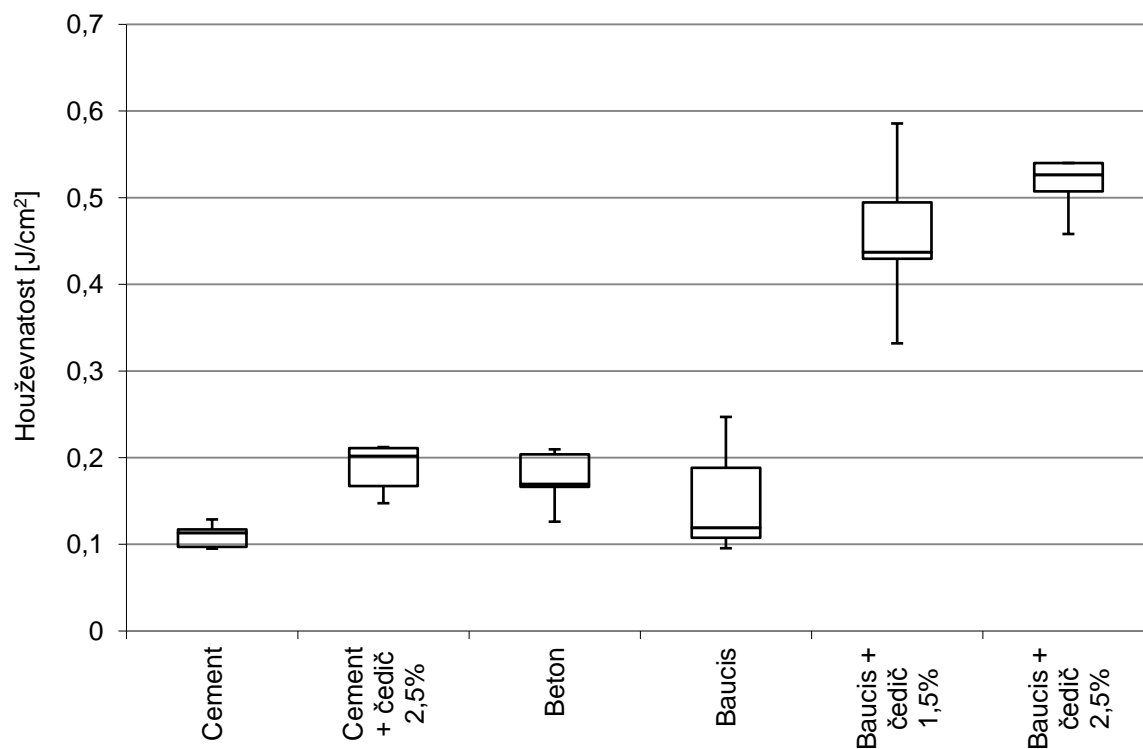
- Energie potřebná k přeražení vzorku E [J]
- Úhel vychýlení [°]

Parametry zkoušení:

- Kyvadlové kladivo 1 J – (Hmotnost 0,24 kg, délka 330 mm)
- Kyvadlové kladivo 5 J – (Hmotnost 1,19 kg, délka 330 mm)
- Výchozí úhel 107,46°
- Nárazová rychlost 2,9 m/s
- Rozteč mezi podporami 40 mm
- Na vzorkách nebyl žádný vrub

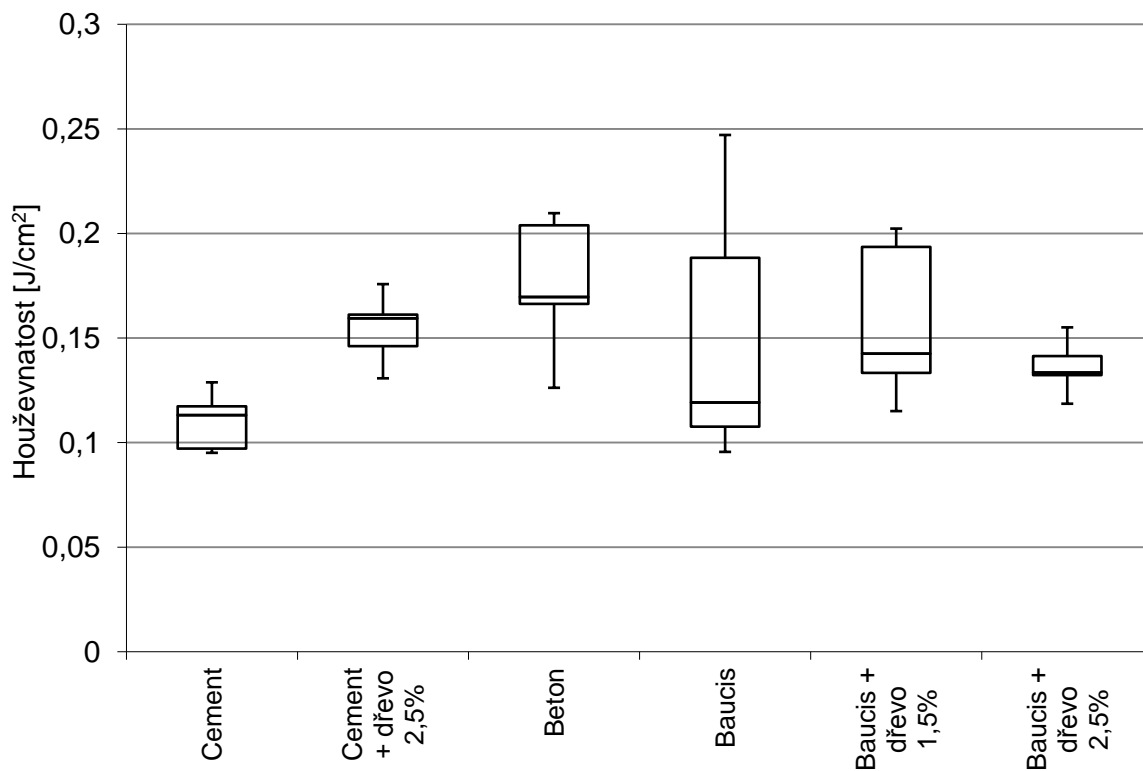
4.6.11 Výsledky zkoušek houževnatosti

Čedičové vlákno



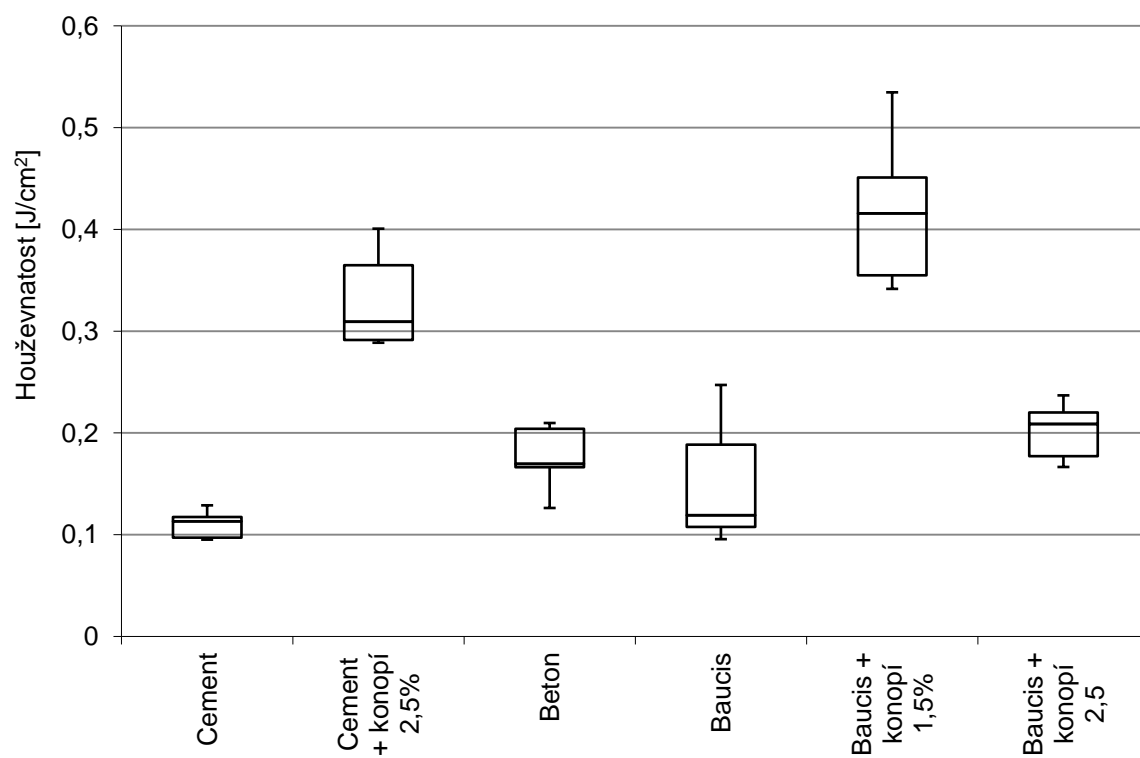
Graf 16: Výsledky zkoušky houževnatosti - Čedičové vlákno

Dřevo (Smrkové) drť



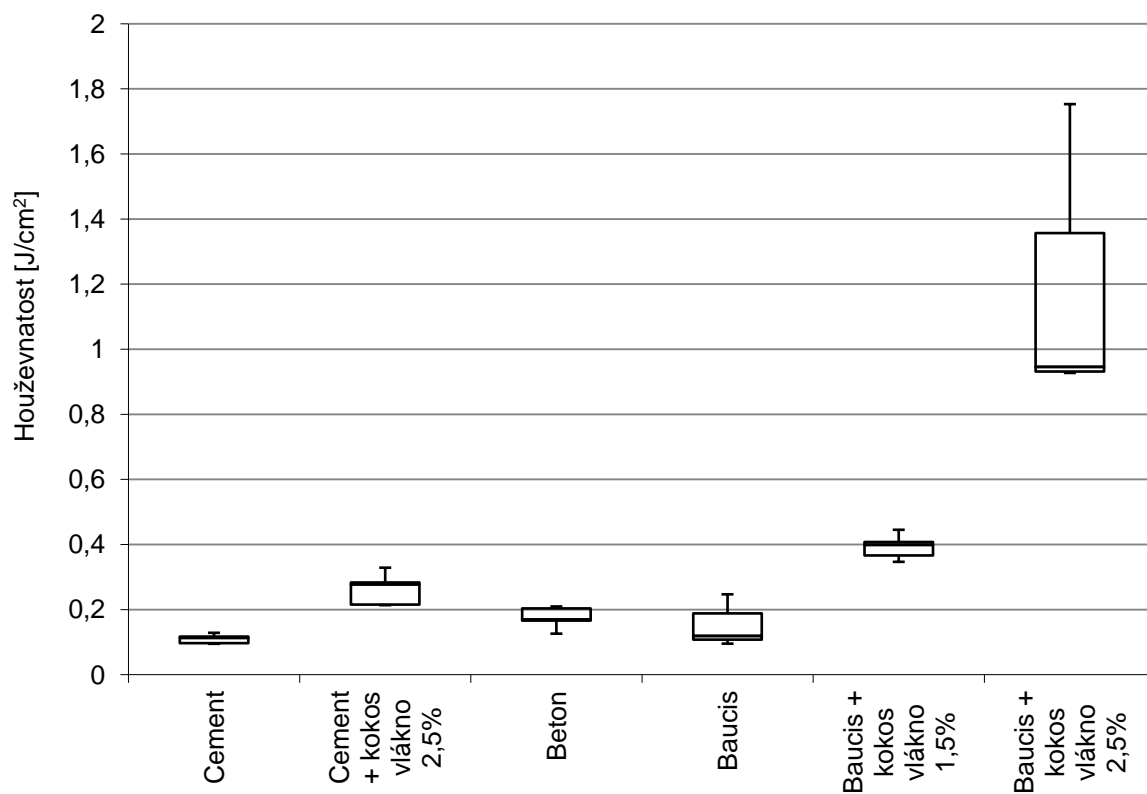
Graf 17: Výsledky zkoušky houževnatosti - Dřevo

Konopné vlákno



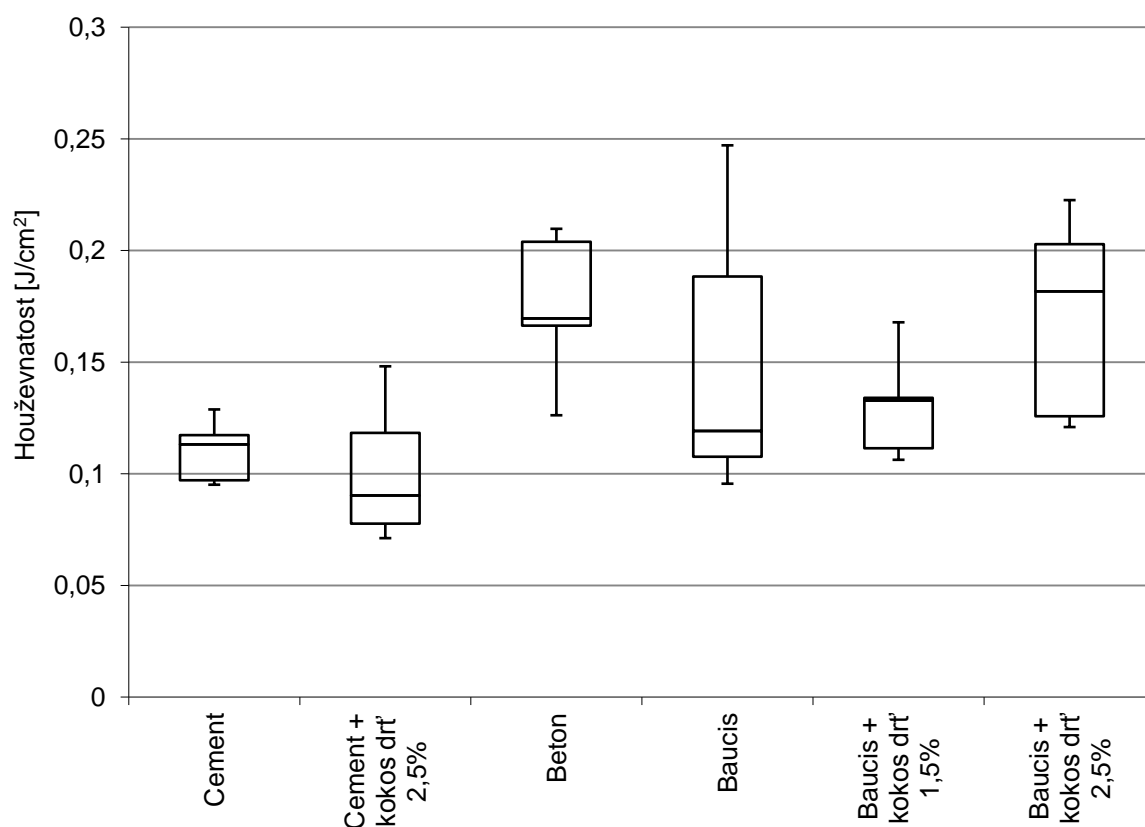
Graf 18: Výsledky zkoušky houževnatosti - Konopné vlákno

Kokosové vlákno



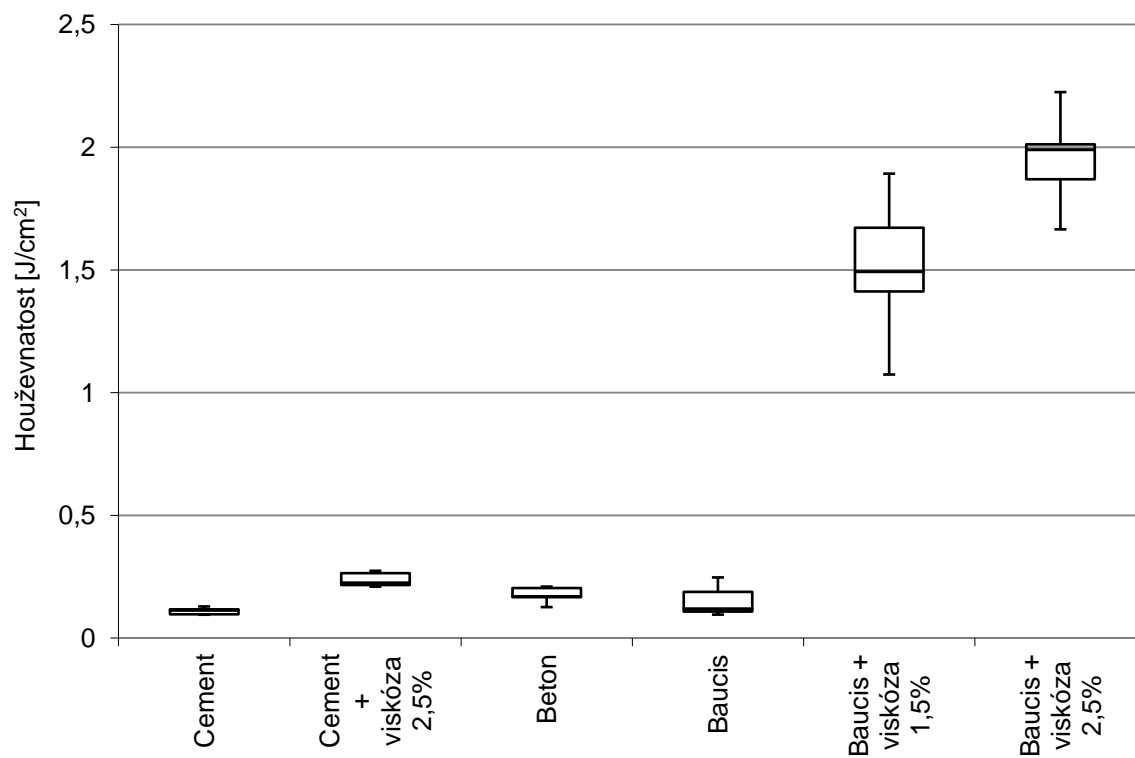
Graf 19: Výsledky zkoušky houževnatosti - Kokosové vlákno

Kokosová drť



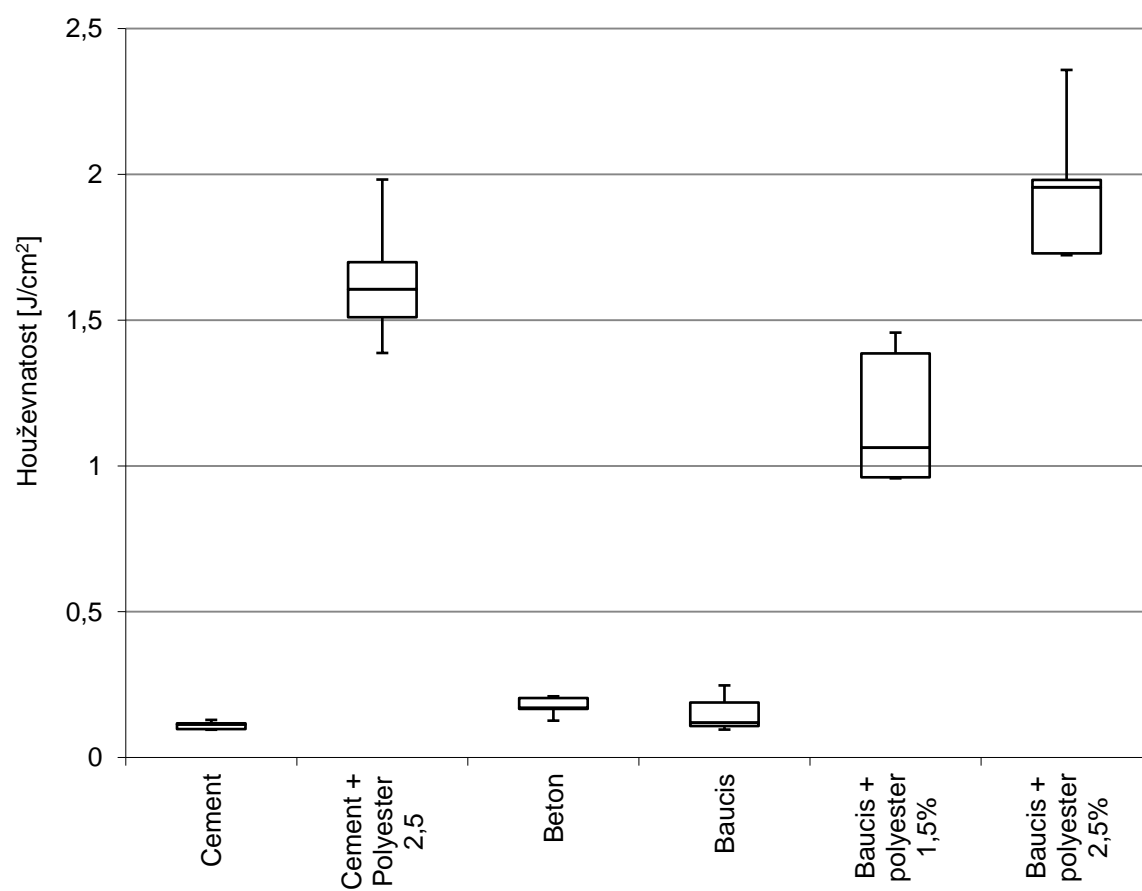
Graf 20: Výsledky zkoušky houževnatosti - Kokosová drť

Viskózné vlákno



Graf 21: Výsledky zkoušky houževnatosti - Viskózné vlákno

Polyesterové vlákno



Graf 22: Výsledky zkoušky houževnatosti - Polyesterové vlákno

5 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Bylo zkoumáno 7 různých plniv ve směsi alkalicky aktivovaného materiálu. Základní složkou (matricí) bylo geopolymerní pojivo se sodným alkalickým aktivátorem Baucis LD 85. Tato plniva byla namíchána s různými procentuálními hmotnostními podíly. Vždy bylo měřeno 5 vzorků pro přesnější výsledky. Pro porovnávací vzorky byl zvolen beton, čistý cement a cement s 2,5 % plniva. Na zkušebních tělesech byly provedeny následující měření a zkoušky: objemová hmotnost v čerstvém a tuhém stavu, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a zkouška houževnatosti pomocí Charpyho kladiva.

Zde také musím zmínit, že beton, který jsem použil jako srovnávací vzorek, byl namíchán v poměru 1:2, což výrobce udává jako nejideálnější poměr, a s pískem s nejlepší dostupnou zrnitostí. V běžné výrobě se beton tak vysoké kvality obvykle nepoužívá. Geopolymer s plnivem, jehož vlastnosti dosáhnou nebo se přiblíží této kvalitě betonu, již můžeme považovat za velmi kvalitní.

Vzorky s čedičovými vlákny

V případě kompozitních systémů, kdy byla vyztužující vlákna z čediče, se při zkoušce tahu i přes zvyšující se procento jen pomalu přibližujeme hodnotám srovnatelným s betonem a výsledné vlastnosti se oproti čistému Baucisu s plnivem 1,5% a 2,5% snižují. Pružnost s rostoucím procentem klesá. V tažnosti dosáhla směs s čedičovým vláknem jeden z nejlepších výsledků; s rostoucím procentem mírně klesá, ale stále je o 20% lepší než beton. Zvyšuje také houževnatost u betonu, Baucisu i srovnávacího vzorku s cementovou matricí, a to více než o polovinu, zvedá se i mez pevnosti. S rostoucím obsahem se však snižuje pevnost v tlaku. Kompozit je vhodný.

Vzorky s drtí ze smrkového dřeva

Zvyšující se procento stabilizuje mez pevnosti v tahu, hodnoty oproti čistému Baucisu jsou ale poloviční, jinak podobné jako u čedičového vlákna. Vzorky dosahují zajímavých hodnot pružnosti, modul pružnosti však s rostoucím procentem klesá. Pozitivní vliv příměsi se ukázal u tažnosti, v níž se zvyšujícím se procentem dosahuje již při 3% plniva hodnot betonu. Pevnost v tlaku ovšem snižuje na polovinu jeho hodnot, přičemž s rostoucím obsahem se mírně zvýší kolem 2,5% plniva a pak opět klesá. Celková houževnatost se s rostoucím procentem plniva jen nepatrně snižuje a při 2,5% plniva je

menší než u betonu o 25%, při 1,5% plniva je o něco lepší než čistý Baucis a srovnatelná s betonem.

Konopné vlákno

V tahu roste mez pevnosti se zvyšujícím se procentem, nad 2,5% plniva dosahují naměřené hodnoty i nad čistý Baucis, přesahují i beton. Podobně pozitivní efekt má toto vlákno i na vlastnosti čistého cementu. Modul pružnosti konopí v Baucisu dosahuje stejných hodnot jako čistý Baucis, pořád však o 20% nižších než beton. Přesto má konopné vlákno nejlepší výsledky v modulu pružnosti. S rostoucím procentem plniva pak modul nepatrně klesá. Nejlepší tažnost konopí vykazuje při 1,5% plniva, jedné z nejlepších naměřených hodnot, s rostoucím procentem tažnosti však klesá na polovinu. Pevnost v tlaku roste se zvyšujícím se obsahem a při 2,5% plniva dosahuje pevnosti betonu. Pevnost v tlaku u Baucisu celkově stabilizuje. Houževnatost se při rostoucím obsahu snižuje, ale při 1,5% plniva téměř trojnásobně přesahuje čistý Baucis a beton, při 2,5% plniva je jeho houževnatost srovnatelná s betonem a lepší než čistý Baucis. Jako plnivo je konopné vlákno vhodné.

Kokosové vlákno

Jeho tahové vlastnosti se zlepšují se stoupajícím procentem, ale dosahují jen na polovinu meze pevnosti betonu či Baucisu. Vlastnosti cementu kokosové vlákno nevylepšuje. Tažnost je srovnatelná s betonem a se zvyšujícím se množstvím nepatrně klesá. Také se snižuje pevnost v tlaku, při 1,5% plniva dosahuje pevnosti betonu. Houževnatost se s rostoucím obsahem rapidně zvedá a při 2,5% plniva dosahuje pětinasobných hodnot než beton a čistý Baucis.

Kokosová drť

V tahu dosahuje poloviny meze pevnosti betonu, která se s rostoucím obsahem plniva se snižuje. Při zkoušce pevnosti v tahu ohybem tedy toto plnivo neobstálo. Také modul pružnosti s nárůstem obsahu plniva rychle klesá a dosahuje jen poloviny úrovně betonu. Tažnost je při 1,5% plniva srovnatelná s betonem a potom rychle klesá, ani v tomto ohledu tedy drť není vhodná. Pevnost v tlaku se s rostoucím obsahem snižuje, při 1,5% plniva dosahuje pevnosti betonu. Houževnatost se s rostoucím procentem plniva zvyšuje

a při 2,5% plniva dosahuje hodnot betonu a lepších než čistý Baucis. Při 1,5% plniva dosáhne hodnot srovnatelných s čistým Baucisem.

Viskózové vlákno

Se zvyšujícím procentem plniva roste mez pevnosti, viskóza má pozitivní vliv i na kombinaci s cementem, nedosahuje však více než 80% pevnosti betonu. Modul pružnosti klesá a dosahuje jen poloviny oproti betonu. Tažnost dosahuje nejlepších vlastností při 2,5% plniva - je o 30% vyšší než u betonu. Pevnost v tlaku se s větším množstvím plniva pomalu snižuje, celkově je o 20% nižší než pevnost betonu. Houževnatost má stoupavou tendenci, už při nízké koncentraci plniva je nárůst znatelný. Nejlepší z měřených vzorků dosahuje při 2,5% plniva až desetinásobek houževnatosti čistého Baucisu a betonu. Při použití v cementu není její zvýšení tak významné jako u Baucisu. Jako plnivo je viskózové vlákno určitě vhodné.

Polyesterové vlákno

Mez pevnosti se zvyšujícím se procentem plniva roste a má pozitivní vliv, při 2,5% plniva dosahuje téměř pevnosti betonu. Modul pružnosti s rostoucím procentem plniva klesá a dosahuje jen 60% betonu, nejvýše kolem 1,5% plniva. Tažnost oproti tomu vzrůstá, a to o 25% více než u betonu. Pevnost se zvyšuje a při 2,5% plniva dosahuje pevnosti betonu. Houževnatost je podobná jako u viskózy, s rostoucím procentem plniva se zvyšuje až na desetinásobek a k výraznému nárůstu dochází i při použití s cementovou matricí. Jako plnivo je polyesterové vlákno vhodné.

6 ZÁVĚR

Předmětem zkoumání diplomové práce byly možnosti využití různých organických a anorganických plniv u alkalicky aktivovaného materiálu Baucis LD85. Syntetická, anorganická vlákna, polyester a viskóza, vykazovala podle mého očekávání dobré výsledky, vzhledem k tomu, že jde o průmyslově vyráběné materiály, u nichž je již při výrobě záměrem dosažení dobrých mechanických vlastností a čistoty.

Organická vlákna, jako jsou konopí či kokosová drť, oproti tomu primárně nejsou stavěná na tento typ použití. Příroda vytvořila jejich struktury jako celek, a tudíž si své vlastnosti po mechanickém rozdělení na jednotlivá vlákna zřídka udrží. Pro příští výzkum bych drť či piliny zkombinoval se syntetickým materiálem a zkoumal je jako vícesložkový kompozit. Teprve s dalším vlákenným plnivem nebo vlákenou mřížkou lze totiž vytvořit dostatečně homogenní směs, z níž drť nebude vyplouvat k povrchu.

I přesto je lze jako plniva využívat: Ke zlepšení vlastností geopolymeru možná nijak výrazně nepřispějí, stále je však lze upotřebit jako výplň, která napomůže zvýšit objem geopolymeru a sníží tak jeho celkovou cenu. Jako nejlepší z organických plniv se ukázalo vlákno konopné.

Při stoupajícím požadavku na ekologičnost a udržitelnost u výrobních procesů nabízí jejich aplikace výbornou možnost ekologického a zároveň efektivního využití odpadu z těchto materiálů, jako jsou například kokosová drť a dřevěné piliny.

Totéž ostatně platí i u materiálů syntetických, jejichž odpady lze takto dále zužitkovávat, aniž by generovaly další znečištění či uhlíkovou stopu v přírodě.

Věřím, že tím tyto materiály coby plniva v kombinaci s geopolymery představují do budoucna velký přínos a že jistě najdou uplatnění.

Seznam použité literatury

1. STRAŇÁK, Vít. Geopolymery. *Matrix-2012.cz* [online]. Přístup 2011 [vid. 16.5.2018] Dostupné z: http://matrix2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery&catid=64:rzne&Itemid=88
2. DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers, green chemistry and sustainable development solutions. In: *Proceedings of the Geopolymer 2005 World Congress*. Saint-Quentin, Geopolymer institute, 2005, ISBN 2-9514820-0-0.
3. STRAŇÁK, Vít. Klonování kamene aneb vzpomínky na budoucnost. In: *Alternativy. Můj dům*. 2008. Str. 218.
4. ČERVINKA, Josef. *Geopolymery – Využití pro restaurování kamene a souvisejících materiálů*. 74 s. Pardubice, 2008. Bakalářská práce. Fakulta restaurování. Univerzita Pardubice. Vedoucí BP Renata Tišlová.
5. BRANDŠTETR, J., OPRAVIL, T., HAVLICA, J.: Geopolymeric materials ancient and for the 21.century. In: *Ecology and new building materials and products*. Telč, 2007. Str. 264-268..
6. DAVIDOVITS, Joseph. Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. In: *Journal of Thermal Analysis*. Saint-Quentin, Geopolymer institute, 1991, vol. 37, p. 1633-1656. [online, vid. 16.5.2018] Dostupné z: https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/J_THERMAL.pdf
7. DĚDEČKOVÁ, Lenka. Geopolymery - Od pyramid k mostům. *4-construction.cz* [online, vid. 16.5.2018] © 2011 Dostupné z: <http://www.4-construction.com/cz/clanek/geopolymery-od-pyramid-k-mostum/>
8. DAVIDOVITS, Joseph. Ancient and Modern Concretes: What is the real difference? In: *Concrete International*, Vol. 9, Issue 12, Saint-Quentin, December 1987, p. 23-35.
9. ŠKVÁRA, František. Alkali activated materials or geopolymer? In: *Ceramics-Silikáty 51*. Praha, 2007. VŠChT. Ústav skla a keramiky. Str. 173-178 [online, vid. 16.5.2018] Dostupné z: https://www.irms.cas.cz/materialy/cs_content/2007/Skvara_CS_2007_0000.pdf
10. VAN JAARSVELD, J.G.S.; VAN DEVENTER, J.S.J. The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals: Part 1: Theory and Applications. In: *Minerals Engineering*. 1996, Vol. 10, no. 7, p. 659-669.

Geopolymer.org [online, vid. 16.5.2018] Dostupné z:

https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/TOXICMET.pdf

11. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A., PALOMO, A., CRIADO, M. Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. In: *Cement and Concrete Research*, Elsevier, 2005., Vol. 35, p. 1204-1209. ISSN: 0008-8846
12. ANTOŠ, P., KOUTNÍK, P. Alkalické aktivátory metakaolinu. In: *Metakaolin 2008 Sborník příspěvků semináře*. Fakulta stavební, VUT Brno, 20.3.2008, Str. 5-10, ISBN 978-80-214-3582-7.
13. KOTLÍK, P.: *Stavební materiály historických objektů*. VŠChT Praha, 1999. Str. 15-40. ISBN 80-7080-347-9
14. PACHECO-TORGAL, Fernando, LABRINCHA, Joao, LEONELLI, C., PALOMO, A., CHINDAPRASIRT, P. *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*. Elsevier, Woodhead Publishing Nr. 54, 2014. ISBN 978-1-78242-288-4. Telegchannel.com [online, vid. 16.5.2018] Dostupné z: <http://h1.telegchannel.com/2018/01/02/187/6219854625978187880.pdf>
15. VNOUČEK, Milan. Kompozitní materiály. Oddělení povrchového inženýrství pro předmět SMA. [online, vid. 16.5.2018] Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/kompozity09_10.pdf
16. DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály – Druhy a jejich užití. Liberec: Technická universita v Liberci, 2007.
17. DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály – Modely a vlastnosti. Liberec: Technická universita v Liberci, 2005
18. ŠRÁMKOVÁ, BcA. Eva. *Příprava historických geopolymérů*. Diplomová práce. Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů. Vedoucí práce doc. Ing. Jaromír Havlica, csc. Brno 2008. [online, vid. 16.5.2017] Dostupné z <https://core.ac.uk/download/pdf/30295511.pdf>
19. NOVÁK, Jaroslav. *Nauka o materiálech 10 (Stavební materiály I)*. Praha, 1997. Fakulta stavební, ČVUT. 1.vyd. 178 s. ISBN 8001016196
20. COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 2. vydání. Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. Str. 11–25. ISBN 978-80-87093-75-7
21. AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. vydání. Praha: ČKAIT, 2009. Str. 74. ISBN 80-86769-39-9

22. PYTLÍK, P. *Technologie betonu*. 1. Vydání. Brno: VUTIUM, 2000. Str. 9–56.
ISBN 80-214-1647-5
23. MILITKÝ, J. *Textilní vlákna klasická a speciální*. Liberec, 2002. Technická univerzita Liberec.
24. ŠVACHOVÁ, Veronika: *Modifikace celulózy pro medicínální účely*. Brno, 2010. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně. [online, vid 17.5.2018]
Dostupné z https://is.muni.cz/th/270274/prif_b/zkracena_bakalarska_prace.pdf
25. *Viskózová vlákna*. Wikipedia.org 2013 [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z
http://cs.wikipedia.org/wiki/Viskózová_vlákna
26. ANÝŽOVÁ, Kamila. *Polyesterová vlákna*. Liberec, 2018. Textilní fakulta Technické univerzity Liberec. *Guffoo.cz* [online, vid.17.5.2018] Dostupné z
<http://www.guffoo.cz/textil-tul/index.php?nid=2634&lid=cs&oid=308591>
27. PRINCE, Richard E. and Prince Engineering. *Basalt Fiber Properties. Build-on-prince.com* © 2011-2017 [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z <http://www.build-on-prince.com/basalt-fiber.html#sthash.96zxuWRu.dpbs>
28. Basaltex, a.s. *Charakteristika čedičových vláken*. *Basaltex.cz* [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z:
http://www.basaltex.cz/cedic/cedic_charakteristika_cz.htm
29. Sichuan Aerospace Tuoxin Basalt Industrial Co., Ltd. *Products/Basalt Chop for Asphalt*. © *Basaltfiber.com* [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z:
<http://www.basaltfiber.com.cn/English/ProductDetail.asp?Id=17&Cate=2>
30. *Čedičová vlákna*. *Odetka.cz* [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z:
http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_basalt.aspx
31. PTÁČEK Luděk a kolektiv: *Nauka o materiálu I*. Brno, 2001. CERM Akademické nakladatelství. ISBN 80-7204-193-2
32. IŽDINSKÁ Z. *Skúška rázom v ohybe*. Strojnícká fakulta STU. *Matnet.sav.sk* © 2006 [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z:
<http://www.matnet.sav.sk/index.php?ID=530>
33. *Textilní zbožíznalství I, Chemická vlákna*. *Turbo.cdv.tul.cz* [online, vid. 17.5.2018] Dostupné z:
<https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/view.php?id=2363&chapterid=3442>

Přílohy

Obsah přiloženého CD:

- Fofňka – Diplomová práce 2018.pdf
- Fofňka – Diplomová práce 2018.docx



ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, a.s.

271 01 Nové Strašecí, Pecínov č.p. 1171

Telefon: +420 313 574 084

Telefax: +420 313 572 131

E-mail: roubicek@cluz.cz

MEFISTO L 05

Použití:

výroba stavebních materiálů

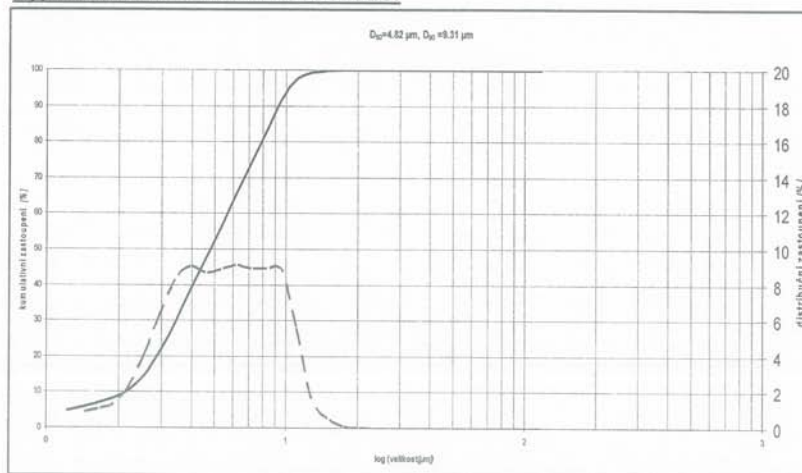
Surovina:

lupek

Typické vlastnosti:

		typická hodnota	garance
Al ₂ O ₃	%	41,90	min. 40
SiO ₂	%	52,90	max. 55,10
K ₂ O	%	0,77	max. 0,9
Fe ₂ O ₃	%	1,08	max. 1,80
TiO ₂	%	1,80	max. 2,00
MgO	%	0,18	max. 0,4
CaO	%	0,13	max. 0,2
Ztráta žiháním	%	1,40	0,3-3,5
Vlhkost	%	0,10	—
Měrný povrch	m ² /g	12,69	—
Pucolánová aktivita	°C	4,50	min. 4,0
Stupeň bělosti	%	60,00	—

Typická distribuční velikost částic:



Tisk: 27.10.2009

Aktualizace: 18.9.2009



ČESKÉ LUPKOVÉ ZÁVODY, a.s.
271 01 Nové Strašecí, Pectmov č. p. 1171

Telefon: +420 313 572 210
Telefax: +420 313 572 121
E-mail: info@clz.cz

GEOPOLYMER

BAUCIS LD85

Anorganické, dvousložkové, hlinitokřemičité pojivo na bázi metakaolínu (část A) aktivované alkalickým aktivátorem (část B). Směs společně s vhodně zvoleným plnivem vytváří mikroporézní strukturu.

Základní surovina:

metakaolín

ČSN 721300: Mefisto L05 (České lupkové závody, a.s.)
světlé šedá barva

alkalický aktivátor

Typické vlastnosti:

- | | |
|---------------------------------|---|
| • počáteční doba tuhnutí (20°C) | cca 85 min |
| • konečná doba tuhnutí (20°C) | cca 105 min |
| • pevnost v tlaku | > 70 MPa ze 28 dní, > 80 MPa ze 180 dní |
| • pevnost v ohybu | > 10 MPa ze 28 dní, > 12 MPa ze 180 dní |

Geopolymerní cement

- výborné adheze k původnímu povrchu (beton, kámen, kov)
- s doporučeným ostřivem použití až do 1200 °C
- chemická odolnost k agresivnímu prostředí
- výborné mechanické vlastnosti
- minimální výskyt výkvětů

Příprava

Při přípravě pojivové směsi na bázi anorganického polymeru je obvykle používána 5 hmotnostních dílů části A; 4,5 hmotnostního dílu části B (aktivátor) a 30% až 200% plniva v závislosti na jeho granulometrii. Typickým ostřivem může být lupek D462 0-0,4 mm (vyráběný Českými lupkovými závody, a.s.), v tomto případě je použito cca 75-125%.

Balení

27 kg papírový pytel + kanystr (25 kg)

340 kg v big bagu + IBC kontejner (max. 1,4t aktivátoru)